

Institutsbericht

IB 111-2014/06

Erstellung einer dynamischen Sichtsimulation für maritime Hubschraubereinsätze

Malte Büchel

Institut für Flugsystemtechnik (DLR FT)
Braunschweig

98	Seiten
54	Abbildungen
5	Tabellen
47	Literaturstellen

Stufe der Zugänglichkeit: I, intern und extern unbeschränkt zugänglich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abt. Hubschrauber
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

Braunschweig, 21.10.2014

Unterschriften:

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. C. Kessler

Betreuer: Dipl.-Ing. M.K. Ben Larbi



The image shows three handwritten signatures in blue ink, each placed over a horizontal line. The first signature is the most prominent and appears to be 'S. Levedag'. The second signature is 'C. Kessler'. The third signature is 'M.K. Ben Larbi'.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 Ozean-Wellen	2
2.1.1 Seegang, Windsee und Dünung	2
2.1.2 Regelmäßige Wellen.....	3
2.1.3 Dispersionsrelation	4
2.1.4 Unregelmäßige Wellen	5
2.1.5 Fourier-Analyse eines Wellensignals	6
2.1.6 Wellenenergie	7
2.1.7 Energiedichte-Spektrum	8
2.1.8 Ermittlung charakteristischer Wellenparameter	10
2.1.9 Modellfunktionen für Seegangsspektren.....	11
2.2 Schiffsbewegung	14
2.2.1 Komponenten der Schiffsbewegung.....	15
2.2.2 Koordinatensysteme.....	15
2.2.3 Begegnungskreisfrequenz zwischen Schiff und Wellen.....	17
2.2.4 Translationen und Rotationen infolge harmonischer Wellen	17
2.2.5 Bewegungsgleichungen	19
2.2.6 Kopplungen der Bewegungen	21
2.2.7 Verhalten in unregelmäßigen Wellen	23
2.3 Aerodynamik von Windkraftanlagen	24
2.3.1 Blattelementtheorie.....	24
2.3.2 Leistungs- und Drehzahlregelung durch Blatteinstellwinkeländerung.....	26
2.3.3 Windrichtungsnachführung des Rotors	28
2.4 Menschliches Leistungsvermögen.....	29
2.4.1 Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen	29
2.4.2 Aufmerksamkeit-Wahrnehmung-Workload	30
3 Offshore-Szenario	32
3.1 Vorstellung des bisherigen Offshore-Szenarios	32
3.2 Dynamische Elemente: Wellen	33
3.3 Dynamische Elemente: Schiffe.....	36

3.3.1	Verwendetes Modell	37
3.3.2	Dynamik der Schiffsbewegung	38
3.3.3	Implementierung der Schiffsdynamik in die Simulation.....	42
3.3.3.1	Modifizierung der Klasse ‚BoatPositionCallback‘	43
3.3.3.2	Funktion zur Berechnung der Koeffizienten.....	45
3.3.3.3	Verwendete Messpunkte für die Funktion ‚getSurfaceHeightAt‘	53
3.3.3.4	Vereinfachte Bestimmung der Wellenneigungswinkel	55
3.3.3.5	Funktion zur Berechnung der Bewegungskomponenten.....	57
3.3.3.6	Numerische Integrationen und Differentiationen	58
3.3.4	Ergebnisse und Verifizierung der Schiffsdynamik.....	62
3.3.5	Verhalten bei Vorwärtsfahrt	68
3.4	Dynamische Elemente: Offshore-Windkraftanlagen	69
3.4.1	Verwendete Modelle	69
3.4.2	Animation der Modelle	69
4	Obstacle-City.....	71
4.1	Bewegung der Kraftfahrzeuge	73
4.2	Bewegung der Turmdrehkrane.....	76
4.3	Windkraftanlagen	77
4.4	Kraftwerk	78
4.5	Weiterer Hubschrauber	78
5	Fazit und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	94
	Anhang A Funktion ‚Calculate_coefficients‘.....	a
	Anhang B Funktion ‚Calculate_motion‘	d

Abkürzungsverzeichnis

AVES	Air Vehicle Simulator
CG	Center of Gravity
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
LSA	Lichtsignalanlage
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
OSG	Open Scene Graph
RAO	Response Amplitude Operator (=Übertragungsfunktion)
UDP	User Datagram Protocol
WAMIT	Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology
WKA	Windkraftanlage

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Definition harmonischer Wellen	3
Abbildung 2	Unregelmäßige Wellen (links: $x, y = \text{const.}$, rechts: $t = \text{const.}$)	5
Abbildung 3	Superposition regelmäßiger Wellen zu einer unregelmäßigen Welle.....	6
Abbildung 4	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wasserspiegelauslenkung.....	7
Abbildung 5	Varianz-Spektrum der Wasserspiegelauslenkung	9
Abbildung 6	Analyse einer Wellenaufzeichnung	10
Abbildung 7	Vorhersagekarte für Wind und Seegang	12
Abbildung 8	MatLab-Plot des mittleren JONSWAP-Spektrums	14
Abbildung 9	Die sechs Freiheitsgrade der Schiffsbewegung	15
Abbildung 10	Koordinatensysteme zur Beschreibung von Schiffsbewegungen.....	16
Abbildung 11	Begegnungskreisfrequenz zwischen Schiff und Wellen	17
Abbildung 12	Superposition von hydromechanischen und welleninduzierten Lasten....	19
Abbildung 13	Prinzip des Transfers von Wellen- in Schiffsbewegungen	24
Abbildung 14	Aerodynamik am Profilquerschnitt eines Blattelements	25
Abbildung 15	Blatteinstellwinkeländerungen zur Leistungsregelung	27
Abbildung 16	Verringerung des Rotorleistungsbeiwertes durch Schräganströmung	28
Abbildung 17	Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen.....	30
Abbildung 18	Generatorgondeln der WKA-Modelle.....	32
Abbildung 19	Versatz mit dem Ampelmann-System.....	33
Abbildung 20	Momentaufnahme der simulierten Wasseroberfläche	34
Abbildung 21	Zeitreihen für verschiedene Punkte der Wasseroberfläche.....	34
Abbildung 22	Vergleich des gemessenen Spektrums mit mean JONSWAP	36
Abbildung 23	3D-Modelle der verfügbaren Schiffe.....	36
Abbildung 24	Blockdiagramm für die Bewegungsgleichungen	42
Abbildung 25	Schiffsbewegungen im osgOcean-Beispiel.....	43
Abbildung 26	Aufruf der Funktion ‚Calculate_coefficients‘	43
Abbildung 27	Bestimmung der Zeitdifferenz für den Iterationsschritt.....	44
Abbildung 28	Flussdiagramm der Klasse ‚BoatPositionCallback‘	45
Abbildung 29	Länge zwischen den Loten L_{pp} und Wasserlinienfläche AWL	46
Abbildung 30	Metazentrische Höhe GM und Hebelarm GZ	47
Abbildung 31	Verwendete Messpunkte für die Funktion ‚getSurfaceHeightAt‘	53
Abbildung 32	Quellcodeausschnitt für die Messpunkte der Tauchbewegung	54
Abbildung 33	Quellcodeausschnitt für die Messpunkte der Rotationen.....	55
Abbildung 34	Vereinfachte Ermittlung der Wellenneigungswinkel.....	56
Abbildung 35	Definition der Funktion ‚Calculate_motion‘	57
Abbildung 36	Aufruf der Funktion ‚Calculate_motion‘ für die Tauchbewegung	58
Abbildung 37	Streuung der Schrittweite bei einer Framerate von 60 Hz	60

Abbildung 38	Oszillationen in der Tauchbewegung.....	61
Abbildung 39	Auslenkungen von z , ϕ und θ bei Abklingversuchen.....	64
Abbildung 40	Impulsantworten für Tauchen, Rollen und Stampfen aus OrcaFlex.....	64
Abbildung 41	Geschwindigkeit und Dämpfungskraft der Tauchbewegung.....	65
Abbildung 42	Beschleunigung und gedämpfte Gesamtkraft der Tauchbewegung.....	66
Abbildung 43	Größen der Tauchbewegung beim Abklingversuch.....	66
Abbildung 44	Schiffsbewegungen Tauchen, Rollen und Stampfen bei Seegang.....	67
Abbildung 45	Roll- und Stampf RAO's eines Containerschiffs.....	68
Abbildung 46	3D-Modelle der Offshore-Windkraftanlagen.....	69
Abbildung 47	Konfiguration eines WKA-Modells über xml.....	70
Abbildung 48	Knotenpunkt in Obstacle City.....	71
Abbildung 49	Übersicht über das Szenario 'Obstacle City'.....	72
Abbildung 50	In Obstacle City verwendete Fahrzeuge.....	73
Abbildung 51	Ausgabe und Bedienoberfläche der Fahrzeugsimulation.....	74
Abbildung 52	Grafische Ausgabe des Simulationstools.....	74
Abbildung 53	Prinzipielle Repräsentation der Fahrzeuge in der xml-Datei.....	75
Abbildung 54	Turmdrehkran in Obstacle City.....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Translationen und Rotationen der Schiffsbewegung.....	15
Tabelle 2	Dimensionen und Kennzahlen der verfügbaren Schiffe	37
Tabelle 3	Allgemeine Skalierungsfaktoren und Skalierung der Koeffizienten.....	38
Tabelle 4	Berechnungsgrundlagen und Ergebnisse der Koeffizienten	52
Tabelle 5	Dimensionen der verwendeten WKA-Modelle.....	69

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Dimension
$a_{i,j}$	Hydrodynamische Masse (Indizes: s. Kapitel 2.2.5)	[kg]
a^*	Faktor für die hydrodynamische Massen	[-]
A_{WL}	Wasserlinienfläche	[m ²]
$b_{i,j}$	Hydrodynamischer Dämpfungskoeffizient	[kg s ⁻¹]
B	Schiffsbreite	[m]
c	Phasengeschwindigkeit einer Welle	[m s ⁻¹]
$c_{i,j}$	Hydrostatische Federsteifigkeit	[kg s ⁻²]
c_{PR}	Leistungsbeiwert des WKA-Rotors	[-]
C_b	Völligkeitsgrad der Verdrängung	[-]
CG_z	Lage des vertikalen Massenschwerpunkts	[m]
C_w	Völligkeitsgrad der Wasserlinienfläche	[-]
E	Gesamtenergie der Wellen pro Einheit der horizontalen Wasseroberfläche	[kg s ⁻²]
f	Wellenfrequenz	[Hz]
f_p	Peakfrequenz des betrachteten Seegangsspektrums	[Hz]
F	Fetch (auch: Windlauflänge)	[m]
F_h	Summe der hydromechanischen, auf das Schiff wirkenden Kräfte	[N]
F_i	Komponente (Kraft- oder Momentensumme) der Gesamtbewegung des Schiffes des i-ten Freiheitsgrades	[N] oder [Nm]
F_w	Summe der welleninduzierten, auf das Schiff wirkenden Kräfte,	[N]
F_{wi}	Welleninduzierte Kraft- oder Momentenkomponente für den i-ten Freiheitsgrad	[N] oder [Nm]
F_A	Auftriebskraft am WKA-Rotorblattelement, $F_A \perp F_W$	[N]
F_{FK}	Froude-Krylov Kraft	[N]
F_N	Normalkraft (= Rotorschub), $F_N \perp F_T$	[N]
F_R	Resultierende Luftkraft	[N]
F_T	Tangentialkraft (Kraft in Drehrichtung des WKA-Rotors), treibt den WKA-Rotor an, $F_T \perp F_N$	[N]
F_W	Widerstandskraft, wirkt in Richtung der effektiven Anströmung v_{eff} , $F_W \perp F_A$	[N]
g	Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$	[m s ⁻²]
\overline{GM}	Transversale metazentrische Höhe	[m]

\overline{GM}_L	Longitudinale metazentrische Höhe	[m]
\overline{GZ}	Hebelarm für das rückstellende Moment	[m]
h	Wassertiefe	[m]
H	Wellenhöhe	[m]
$H_{1/3}$	Signifikante Wellenhöhe (auch H_{m_0} , wenn über nulltes spektrales Moment $m_{0\zeta}$ bestimmt)	[m]
$I_{xx}, I_{xz}, I_{yy}, I_{zz}, I_{zx}$	Massenträgheitsmomente des Schiffes	[kg m ²]
k	Wellenzahl	[rad m ⁻¹]
k_{xx}	Trägheitsradius um die x-Achse	[m]
k_{yy}	Trägheitsradius um die y-Achse	[m]
L	Länge (Schiffslänge) über alles	[m]
L_{pp}	Länge (Schiffslänge) zwischen den Loten	[m]
$m_{0\zeta}$	Nulltes Moment des betrachteten Seegangsspektrums	[m ²]
r	Abstand von der Windkraftanlagen-Rotorachse	[m]
$S_\zeta(f)$ oder $S_\zeta(\omega)$	Wert des betrachteten Seegangsspektrums für die Wellenfrequenz f bzw. die Wellenkreisfrequenz ω	[m ² s]
T	Tiefgang (engl.: <i>draught</i>)	[m]
T_z	Periodendauer der Tauch-Eigenschwingung	[s]
T_ϕ	Periodendauer der Roll-Eigenschwingung	[s]
T_θ	Periodendauer der Stampf-Eigenschwingung	[s]
u	Blattspitzengeschwindigkeit des WKA-Rotors	[m s ⁻¹]
U_{10}	Windgeschwindigkeit in 10 m über der mittleren Wasserspiegelhöhe	[m s ⁻¹]
V	Geschwindigkeitsvektor des Schiffes in Fahrtrichtung	[m s ⁻¹]
v_a	Axiale Durchströmungsgeschwindigkeit des WKA-Rotors	[m s ⁻¹]
v_{eff}	Effektive Anströmung eins WKA-Rotorblattelements	[m s ⁻¹]
v_u	Aus der Umdrehung des WKA-Rotors resultierende Anströmung	[m s ⁻¹]
v_w	Windgeschwindigkeit bei Windkraftanlagen	[m s ⁻¹]
X_{hi}	Hydrodynamischer Kraft- oder Momentenanteil für den i-ten Freiheitsgrades	[N] oder [Nm]
X_{wi}	Welleninduzierter Kraft- oder Momentenanteil für den i-ten Freiheitsgrad	[N] oder [Nm]
x y	Auslenkungen bzw. Wegkoordinaten entlang einer	[m]

z	Koordinatenachse	
α	Anstellwinkel des WKA-Rotorblattelements	[rad] oder [°]
ε	Phasenwinkel	[rad] oder [°]
ζ	z-Auslenkung der Wasseroberfläche bzw. der Welle	[m]
ζ^*	Effektive bzw. reduzierte Auslenkung der Wasseroberfläche bzw. der Welle in z-Richtung	[m]
ϑ	Einstellwinkel des WKA-Rotorblattelements	[rad] oder [°]
θ	Stampfwinkel des Schiffes	[rad] oder [°]
θ_w	Wellenneigungswinkel in Schiff-Längsrichtung	[rad] oder [°]
λ	Wellenlänge (bis auf Kapitel 2.3)	[m]
λ	Schnelldrehzahl eines WKA-Rotors, $\lambda = \frac{u}{v_w}$ (nur in Kapitel 2.3)	[-]
μ	Auf V bezogene Richtung der Wellenausbreitung	[rad] oder [°]
ρ	Dichte von Meerwasser, $\rho = 1025 \text{ kg m}^{-3}$	[kg m ⁻³]
σ_ζ	Standardabweichung der Wasserspiegelauslenkung	[m]
σ_ζ^2	Varianz der Wasserspiegelauslenkung	[m ²]
ϕ	Rollwinkel des Schiffes	[rad] oder [°]
ϕ_w	Wellenneigungswinkel in Schiff-Querrichtung	[rad] oder [°]
ψ	Gierwinkel des Schiffes	[rad] oder [°]
ω	Wellenkreisfrequenz, Kreisfrequenz	[rad s ⁻¹]
ω_e	Begegnungskreisfrequenz zwischen Schiff und Wellen	[rad s ⁻¹]
∇	Verdrängungsvolumen des Schiffes	[m ³]

1 Einleitung

Gegenstand dieser Arbeit sind zwei Szenarien für die Hubschraubersimulation. Es handelt sich dabei zum einen um ein Offshore-Szenario mit Windkraftanlagen (WKA), Umspann- und Forschungsplattformen sowie Schiffen und zum anderen um ein Szenario, das eine kleine Stadt mit zahlreichen Hindernissen („Obstacle City“) enthält. Beide Szenarien enthalten in ihrem bisherigen Zustand bis auf sich drehende Rotoren der Offshore-WKA noch keine dynamischen Elemente. Um den Realitätsgrad der Simulation zu erhöhen, sollen daher im Rahmen dieser Arbeit weitere dynamische Elemente hinzugefügt werden. Die zwei wichtigsten davon sind eine mit dem Seegang interagierende Schiffsbewegung im Offshore-Szenario und eine dynamische Simulation von Kraftfahrzeugen auf den Hauptstraßen und an einem lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt im Szenario „Obstacle City“. Die Priorität liegt dabei auf der Implementierung der Schiffsbewegung.

Während der Erprobung neu entwickelter Pilotenassistenzsysteme im Simulator kommen in wiederkehrenden Abständen erfahrene Piloten als Probanden zum Einsatz, mit deren Hilfe der Entwicklungsstand der Systeme evaluiert wird. Die dynamischen Elemente im Szenario Obstacle City sind in erster Linie dazu gedacht, die Probanden in schwierigen Flugsituationen wie beispielsweise Landungen unter engen Platzverhältnissen zusätzlich abzulenken und an die Grenzen ihrer mentalen Leistungsfähigkeit zu bringen. Wird anschließend die gleiche oder eine vergleichbare Situation mit eingeschaltetem Assistenzsystem wiederholt, kann der Proband beide Situationen miteinander vergleichen und hinsichtlich seiner mentalen Arbeitsbelastung bewerten. Aus diesen Erhebungen lassen sich wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung des jeweiligen Systems ableiten. Die oben beschriebene Ablenkung wäre ohne dynamische Elemente deutlich geringer, obwohl durch Hindernisse wie Stromleitungen, die erst spät bemerkt werden, bereits eine ausreichend hohe Arbeitsbelastung des Piloten eintreten kann, unter der er ein Assistenzsystem als hilfreich oder nützlich bewerten würde. Durch die Implementierung einer dynamischen Schiffsbewegung in das Offshore-Szenario wird zum Beispiel die simulationsgebundene Erprobung von Assistenzsystemen im Zusammenhang mit Schiffsdecklandungen ermöglicht.

2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden allgemeine Grundlagen zu den Themen Ozean-Wellen, Schiffsbewegung, Aerodynamik von Windkraftanlagen und Bewegung von Straßenfahrzeugen betrachtet. Diese sollen dem besseren Verständnis der Inhalte der anschließenden Kapitel dienen. Vor dem Hintergrund, dass die durch dynamische Elemente erweiterten Szenarien primär für die Entwicklung bzw. Tests von neuen Pilotenassistenzsystemen genutzt werden sollen, enthält dieses Kapitel auch Grundlagen zum Thema menschliches Leistungsvermögen.

2.1 Ozean-Wellen

Gegenstand dieses Abschnitts sind unregelmäßige Wellen, die an der Oberfläche von Ozeanen auftreten [1]. Nach einer Einteilung verschiedener Wellentypen und grundlegenden Zusammenhängen regelmäßiger Wellen werden die Ausbreitungseigenschaften von Wellen in Abhängigkeit von der Wassertiefe betrachtet. Anschließend werden die Zusammenhänge zwischen regelmäßigen und unregelmäßigen Wellen vorgestellt, bevor eine Methode zur Ermittlung einzelner harmonischer Komponenten aus einer Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung erläutert wird. Außerdem wird beschrieben, welche Energie in den Wellen gespeichert ist und wie sich diese in Form eines Energiedichtespektrums darstellen lässt. Schließlich wird noch erläutert, wie sich charakteristische Wellenparameter mit Hilfe eines bekannten Energiedichtespektrums bestimmen lassen und welchen praktischen Nutzen Modellfunktionen für Seegangsspektren haben. Daneben wird auch ein gängiges Modellspektrum vorgestellt.

2.1.1 Seegang, Windsee und Dünung

Grundsätzlich lassen sich Ozeanwellen in zwei verschiedene Wellentypen aufteilen, welche sich hinsichtlich ihres Entstehungsprozesses unterscheiden. Wellen, die durch Windeinfluss im Beobachtungsgebiet entstehen, werden Windwellen oder Windsee genannt (engl.: sea). Wellen, die nicht im Beobachtungsgebiet entstehen, werden hingegen als Dünung (engl.: swell) bezeichnet [1]. Die Entstehungsursache für Dünung kann ein tausende Kilometer weit entfernter schwerer Sturm sein. So können zum Beispiel Wellen, die die südkalifornische Küste erreichen in zehntausend Kilometern Entfernung in antarktischen Gewässern entstanden sein [2]. Windsee und Dünung zusammen werden als Seegang bezeichnet. Dabei handelt es sich um die Bewegungen der Wasseroberfläche, die tatsächlich beobachtet und gemessen werden können.

Windsee verfügt üblicherweise über eine kürzere Periodendauer bzw. eine höhere Frequenz als Dünung [1]. Windwellen sind dementsprechend wesentlich steiler und kürzer ausgeprägt als Dünungswellen und durch eine große Unregelmäßigkeit gekennzeichnet [1]. Dennoch können sie als Superposition vieler einfacher, regelmäßiger harmonischer

Einzelwellen betrachtet werden, die jeweils über eine individuelle Amplitude, Wellenlänge (bzw. Periodendauer oder Frequenz) und Ausbreitungsrichtung verfügen [1].

2.1.2 Regelmäßige Wellen

Der Begriff „regelmäßige Welle“ leitet sich vom englischen Begriff *regular wave* ab und wird im Folgenden als Synonym für harmonische (d.h. sinus- oder kosinusförmige) Wellen verwendet.

Die Gleichungen (2.1) und (2.2) gelten für jede der harmonischen Einzelwellen des Seegangs. Gleichung (2.1) und Abbildung 1a zeigen das Verhalten der Auslenkung ζ der harmonischen Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt in Abhängigkeit des Weges x mit der Amplitude ζ_a und der Wellenlänge λ [1]. Dabei ist die Wegkoordinate x positiv in Ausbreitungsrichtung der betrachteten Welle definiert. Die Wassertiefe h wird zwischen Meeresboden ($z = -h$) und dem Ruhewasserspiegel ($z = 0$) gemessen [1]. Die Wellenhöhe H ist der vertikale Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Umkehrpunkt der Welle, d.h. zwischen Wellenkamm und Wellentrog. Sie beträgt $H = 2\zeta_a$ und ist damit doppelt so groß, wie die Amplitude der Auslenkung der Welle ζ_a [1].

$$\zeta(x) = \zeta_a \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

Gleichung (2.2) und Abbildung 1b zeigen, wie sich die harmonische Welle ζ in Abhängigkeit von der Zeit t verhält [1].

$$\zeta(t) = \zeta_a \cos(\omega \cdot t) \quad (2.2)$$

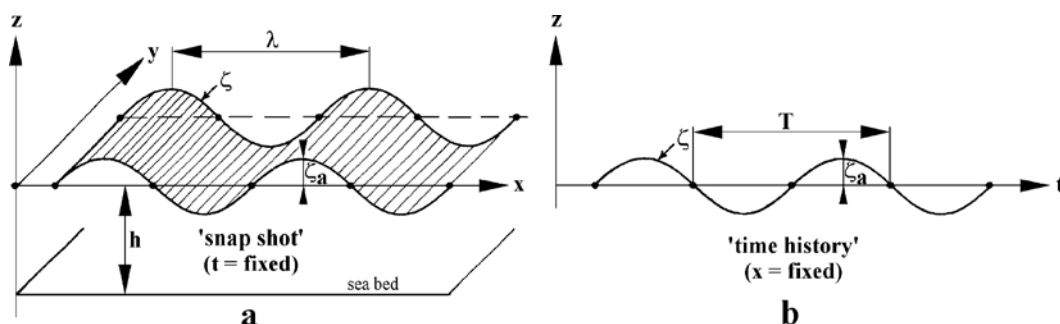


Abbildung 1 Definition harmonischer Wellen

Quelle: [1], S. 8

Aufgrund der trigonometrischen Funktionen in den Gleichungen (2.1) und (2.2), werden für die auf Winkel bezogene Periodendauer T und Wellenlänge λ auch die Größen k und ω verwendet (s. Gleichung (2.3) und Gleichung (2.4)). Darin ist k die Wellenzahl [rad/m]

und ω die Wellenkreisfrequenz [rad/s] [1]. Beide Größen werden jeweils auf eine ganze Schwingung bezogen, also auf 2π bzw. 360° .

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

Hieraus ergibt sich auch der Zusammenhang für die Phasengeschwindigkeit c der Wellenbewegung. Dies ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine bestimmte Phase der Welle ausbreitet, beispielsweise die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wellenkamms [2]. Während einer Periode der Dauer T ($= f^{-1}$) bewegt sich die betrachtete Welle um eine Wellenlänge λ in Ausbreitungsrichtung weiter (s. Gleichung (2.5)) [1]. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit wird auch als Phasengeschwindigkeit bezeichnet.

$$c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (2.5)$$

Das Profil einer Welle beschreibt die Form der Wasseroberfläche und kann für die Ausbreitung in positiver x -Richtung als Funktion von x und t wie folgt beschrieben werden [1]:

$$\zeta(x, t) = \zeta_a \cos(kx - \omega t) \quad (2.6)$$

2.1.3 Dispersionsrelation

Wie Gleichung (2.5) bereits zeigt, hängt die Ausbreitung von Wellen von der Wellenkreisfrequenz ω und von der Wellenzahl k ab. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen wird durch die sogenannte Dispersionsrelation (Gleichung (2.7)) bestimmt [3]. Hierin ist $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ die Erdbeschleunigung.

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h) \quad (2.7)$$

Diese Relation gilt für alle Wassertiefen [1]. Als hilfreich haben sich jedoch für die Praxis die beiden folgenden Näherungen erwiesen [2].

1. Die Tiefwasser-Näherung gilt, wenn die Wassertiefe h deutlich größer ist als die Wellenlänge λ , also $h \gg \lambda$ und $k \cdot h \gg 1$. Damit wird $\tanh(k \cdot h) = 1$.
2. Die Seichtwasser-Näherung gilt, wenn die Wassertiefe h deutlich kleiner ist als die Wellenlänge λ , also $h \ll \lambda$. In diesem Fall wird $\tanh(k \cdot h) = k \cdot h$.

Aus diesen Näherungen ergeben sich die Gleichungen (2.8) und (2.9) [2].

$$\omega^2 = g \cdot k \quad \text{Tiefwasser-Dispersionsrelation} \quad (2.8)$$

$$\omega^2 = g \cdot k^2 \cdot h \quad \text{Seichtwasser-Dispersionsrelation} \quad (2.9)$$

Mit $\omega = \sqrt{g \cdot k}$ und $k = \frac{\omega^2}{g}$ aus Gleichung (2.8) ergeben sich mit Gleichung (2.10) zwei weitere wichtige Definitionen für die Phasengeschwindigkeit aus Gleichung (2.5). Da in Gleichung (2.10) die Tiefwasser-Dispersionsrelation einfließt, ist sie nur für Wellen in tiefen Gewässern gültig [1].

$$c = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega} \quad (2.10)$$

2.1.4 Unregelmäßige Wellen

Der Begriff „unregelmäßige Wellen“ leitet sich aus dem englischen Begriff *irregular waves* ab und wird im Folgenden für Wellen verwendet, die nicht über die Periodizität einer Sinus- oder Kosinuswelle verfügen und deren Amplituden zufallsverteilt sind und somit statistischen Schwankungen unterliegen. Aus diesem Grund werden unregelmäßige Wellen im Englischen auch als *random waves* bezeichnet [4].

Die unregelmäßigen Wellen eines Seegangs stellen eine Überlagerung (Superposition) aller an einem Ort gleichzeitig auftretenden Wind- und Dünungswellen dar [1]. Abbildung 2 zeigt links das Signal unregelmäßiger Wellen an einem festen Ort, und rechts das Signal unregelmäßiger Wellen zu einem bestimmten Zeitpunkt für einen bestimmten Bereich mit der Kantenlänge 200 m.

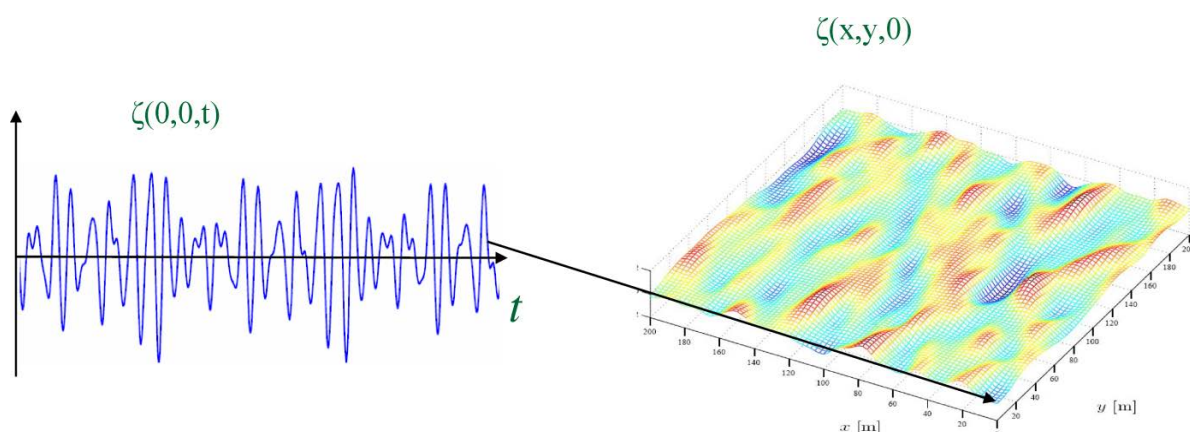


Abbildung 2 Unregelmäßige Wellen (links: $(x, y) = \text{const.}$, rechts: $t = \text{const.}$)

Quelle: [5], Modul 5, S. 5

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für ein unregelmäßiges Wellensignal $\eta(t)$, welches durch Superposition der vier darüber abgebildeten einzelnen harmonischen Wellen entsteht. Die

Einzelsignale werden in Abbildung 3 mit $\eta_i(t)$ und die Amplituden mit a bezeichnet. Alle vier einzelnen Wellen bewegen sich in die gleiche Richtung, d.h. unidirektional.

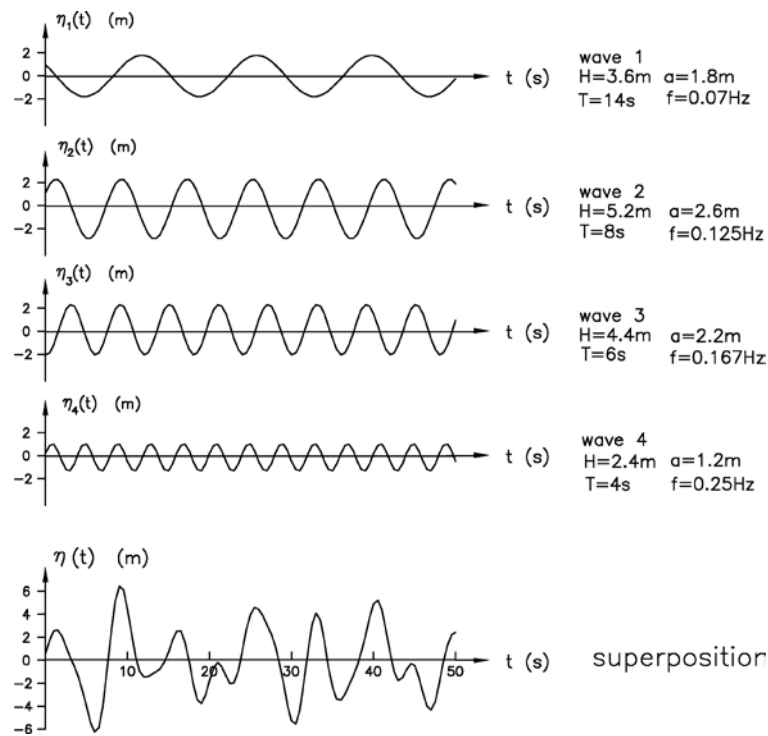


Abbildung 3 Superposition regelmäßiger Wellen zu einer unregelmäßigen Welle

Quelle: [6], S. 75

Unregelmäßige Wellen können nach dem Superpositionsprinzip mit Hilfe von Gleichung (2.11) beschrieben werden [1]. Hierin sind ζ_{a_n} die Amplituden, k_n die Wellenzahlen und ε_n die Phasenverschiebungen der N harmonischen Einzelwellen. Mit Gleichung (2.11) wird die Wasserspiegelauslenkung zu einem bestimmten Zeitpunkt t an einem durch die Wegkoordinate x bestimmten Ort entlang der betrachteten Ausbreitungsrichtung beschrieben.

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) \quad (2.11)$$

2.1.5 Fourier-Analyse eines Wellensignals

Eine Umkehrung der Superposition, also die Zerlegung eines vorhandenen Signals in seine Einzelkomponenten, ist ebenfalls möglich. Die momentane Wasserspiegelauslenkung $\zeta(t)$ gilt als normalverteilt und hat einen Mittelwert von Null [1], (vgl. Abbildung 4).

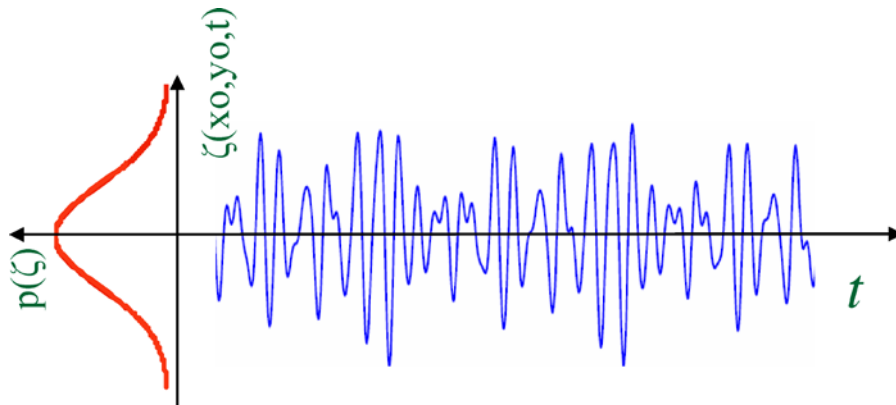


Abbildung 4 Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wasserspiegelauslenkung

Quelle: [5], Modul 5, S. 6

Mit Hilfe der Fourier-Analyse eines aufgezeichneten Wellensignals $\zeta(t)$ können die Amplituden ζ_{a_n} der einzelnen harmonischen Wellen ermittelt werden [1]. Zu jedem Zeitpunkt setzt sich die gemessene Wasserspiegelauslenkung aus einer Reihe neuer Amplituden zusammen [1]. Die dazu benötigten Messwerte werden vorher zum Beispiel mit Hilfe von am Meeresboden verankerten Bojen aufgenommen, deren Position näherungsweise als konstant angenommen wird. Die Wegkoordinate x kann damit Null gesetzt werden, wodurch sich Gleichung (2.11) vereinfacht [6] zu:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (2.12)$$

Zusammen mit Gleichung (2.12) ergibt sich für das in Abbildung 3 gezeigte Beispiel folgender Zusammenhang [6]:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^4 \zeta_n(t) = \sum_{n=1}^4 \zeta_{a_n} \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (2.13)$$

2.1.6 Wellenenergie

Die Gesamtenergie E , die in den Wellen gespeichert ist, setzt sich aus potentieller Energie und kinetischer Energie zusammen. An jeder einzelnen Position unterliegen diese beiden Energieanteile infolge der Verformung der Wasseroberfläche kontinuierlichen Änderungen [1]. Die Gesamtenergie für einen definierten horizontalen Bereich der Wasseroberfläche wird durch Gleichung (2.14) beschrieben [1]. Hierin ist ρ die Dichte von Meerwasser ($\rho = 1025 \text{ kg m}^{-3}$). Die Gesamtenergie E wird auch als Seegangsenergie bezeichnet und entsteht aus der Umwandlung atmosphärischer Windenergie [7]. Die Seegangsenergie ist auch für die Entwicklung globaler Klimamodelle von entscheidender Bedeutung [7].

$$E = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 \quad (2.14)$$

Die Umwandlung von Windenergie in Wellenenergie wird im Wesentlichen durch die Windgeschwindigkeit, die Dauer der Windeinwirkung und die Windlauflänge bestimmt [2]. Die Windlauflänge wird in der Fachsprache auch als der Fetch (engl.: *fetch*) bezeichnet. Die Wellenhöhe nimmt dabei mit zunehmender Windgeschwindigkeit, Dauer der Windeinwirkung und Windlauflänge zu [2]. Ab einer Windgeschwindigkeit von etwa 1 m/s nahe der Wasseroberfläche lassen sich Oberflächenwellen beobachten [6]. Die Ursache für diese Wellen sind Turbulenzen des Windes, die zufällige Druckschwankungen an der Wasseroberfläche bewirken, wodurch Energie an erste flache Wellen mit geringer Länge (5-10 cm bei Höhen von 1-2 cm) übertragen wird [8], [9]. Anschließend kommt es zu komplexen nichtlinearen Interaktionen zwischen einzelnen Wellen des Spektrums [10], [9]. Dabei wird Energie von kürzeren in längere Wellen transferiert, was dazu führt, dass sich mehr und mehr längere Wellen entwickeln [9]. Mit zunehmender Wellenhöhe wird die Wind-Wellen-Energieübertragung aufgrund der zunehmenden Oberflächenrauigkeit effektiver [6]. Es kann jedoch nur dann überhaupt Wind- in Wellenenergie transformiert werden, wenn die Geschwindigkeitskomponente des Windes nahe der Wasseroberfläche in Ausbreitungsrichtung der betrachteten Welle größer ist, als die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Welle [9].

2.1.7 Energiedichte-Spektrum

Aus den mit Hilfe der Fourierreihen-Analyse gewonnenen Amplituden der einzelnen harmonischen Wellen des gemessenen Signals lässt sich ein kontinuierliches Varianz-Spektrum $S_{\zeta}(f)$ erstellen. Dafür wird zunächst für jede einzelne der insgesamt N Wellen die dazugehörige Varianz der Wasserspiegelauslenkung benötigt, welche man mit Gleichung (2.15) erhält [1].

$$\sigma_{\zeta}^2 = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2 \quad (2.15)$$

Hieraus entsteht dann mit Gleichung (2.16) das Spektrum $S_{\zeta}(f)$ [m^2s] mit der Frequenzbandbreite Δf , welches für $\Delta f \rightarrow 0$ zu einem kontinuierlichen Spektrum wird (vgl. Abbildung 5) [1], [6]. Das Spektrum wird in der Literatur zumeist als zeitabhängiges Spektrum angegeben ($S_{\zeta}(\omega)$ oder $S_{\zeta}(f)$). Unter Zuhilfenahme der Dispersionsrelation (Gleichungen (2.8) und (2.9)) lässt sich das Spektrum mit der Wellenzahl k als $S_{\zeta}(k)$ auch raumabhängig darstellen. Die Verwendung eines raumabhängigen Spektrums kann für bestimmte Anwendungen hilfreich sein.

$$S_{\zeta}(f_n) = \frac{\frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2}{\Delta f} \quad (2.16)$$

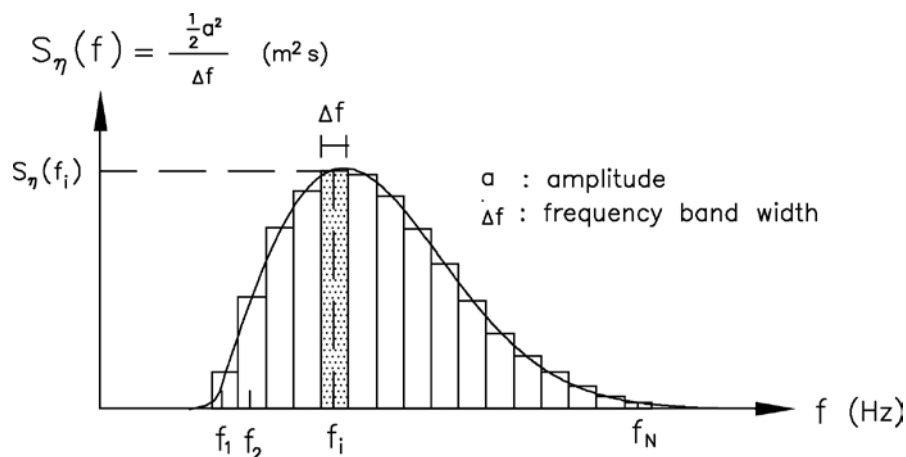


Abbildung 5 Varianz-Spektrum der Wasserspiegelauslenkung

Quelle: [6], S. 77

Wie aus den Gleichungen (2.14) und (2.15) ersichtlich ist, sind die Gesamtenergie E und die Varianz der Wasserspiegelauslenkung σ_a^2 direkt proportional zueinander. Genaugenommen müsste das Spektrum $S_\zeta(f)$ mit ρg multipliziert werden, um das sogenannte Energiedichtespektrum zu erhalten (s. Gleichung (2.17)) [6]. Aufgrund der direkten Proportionalität von E und σ_ζ^2 ist diese Bezeichnung jedoch auch für ein Spektrum nach Gleichung (2.16) gebräuchlich.

$$S_\zeta(f) = \frac{\frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2}{\Delta f} \quad (2.17)$$

Der Zusammenhang zwischen der Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung, den einzelnen harmonischen Wellen und dem Energiedichtespektrum ist in Abbildung 6 nochmals zusammenfassend dargestellt.

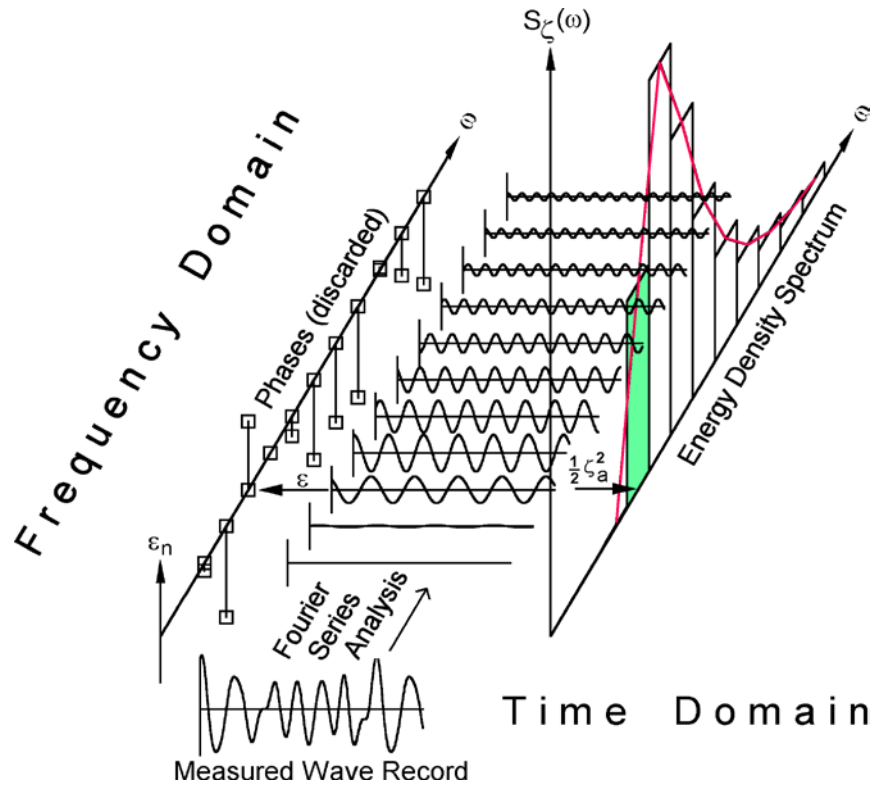


Abbildung 6 Analyse einer Wellenaufzeichnung

In Anlehnung an: [1], S. 20

2.1.8 Ermittlung charakteristischer Wellenparameter

Gleichung (2.18) beschreibt die spektralen Momente $m_{n\zeta}$, die sich auf die Vertikalachse des Spektrums beziehen [1]. Wie aus Gleichung (2.18) ersichtlich ist, entspricht das Moment nullter Ordnung $m_{0\zeta}$ der Fläche unter der Spektralkurve [1]. Das Moment 1. Ordnung ($n = 1$) ist das statische Moment dieser Fläche und für $n = 2$ erhält man das Trägheitsmoment [1]. An Gleichung (2.18) ist auch zu erkennen, dass hohe Frequenzen des Spektrums mit zunehmender Ordnung des Momentes stärker gewichtet werden [6].

$$m_{n\zeta} = \int_0^{\infty} f^n S_{\zeta}(f) df \quad (2.18)$$

Mit Hilfe dieser Momente lässt sich auch belegen, dass die Energiedichtespektren näherungsweise der Rayleigh-Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen [6]. Für eine rayleighverteilte Größe x mit der Standardabweichung σ gilt Gleichung (2.19) [11].

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right\} \quad (2.19)$$

Die oben beschriebene Näherung gilt für normale Wellenspektren, die mit Frequenzen zwischen $f \approx 0,032 \text{ Hz}$ ($\omega = 0.2 \text{ rad/s}$) und $f \approx 0,24 \dots 0,32 \text{ Hz}$ ($\omega = 1.5 - 2.0 \text{ rad/s}$) als

relativ schmale Spektren gelten [1]. Für den Fall, dass die Wellenhöhe H exakt der Rayleigh-Verteilung folgt, kann die signifikante Wellenhöhe $H_{1/3}$ auch mit Gleichung (2.20) über das nullte Moment des Energiedichtespektrums berechnet werden [6]. Sie wird in diesem Fall als H_{m_0} bezeichnet, da $H_{1/3}$ auch anders bestimmt werden kann [6]. Die signifikante Wellenhöhe $H_{1/3}$ ist definiert als der Mittelwert des oberen Drittels aller Wellenhöhen $H = 2\zeta_a$ einer Messung [1].

$$H_{m_0} = 4 \cdot \sqrt{m_{0\zeta}} \quad (2.20)$$

Auch die signifikante Wellenamplitude $\zeta_{a_{1/3}}$ und die Standardabweichung der Wasserspiegelauslenkung σ_ζ lassen sich mit den Gleichungen (2.21) und (2.22) über $m_{0\zeta}$ berechnen [1].

$$\zeta_{a_{1/3}} = 2 \cdot \sqrt{m_{0\zeta}} \quad (2.21)$$

$$\sigma_\zeta = \sqrt{m_{0\zeta}} \quad (2.22)$$

2.1.9 Modellfunktionen für Seegangsspektren

Um auch ohne aktuelle Wellenmessdaten Vorhersagen über den zu erwartenden Seegang (bzw. das Spektrum) erstellen zu können, werden Modellfunktionen für Seegangsspektren benötigt. Diese Modellfunktionen basieren auf empirischen Anpassungen ausgewählter Wellenmessreihen in Verbindung mit dimensional und theoretischen Überlegungen [10]. Als Eingangsdaten für die mit solchen Funktionen erstellten Seegangsvorhersagen werden Winddaten verwendet, die den Berechnungen numerischer Wettermodelle entstammen [2]. Abbildung 7 zeigt eine Vorhersagekarte für Wind und Seegang für den Bereich der Nordsee. Hierin sind die signifikanten Wellenhöhen $H_{1/3}$ in neun Klassen unterteilt farbig dargestellt. Daneben enthält die Karte schwarze Pfeile, welche die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung in einer Höhe von zehn Metern anzeigen. Die Spitze eines solchen Windpfeils zeigt an, in welche Richtung der Wind weht. Die Geschwindigkeit wird durch auf dem Pfeil sitzende Striche angegeben [12]. Ein kurzer Strich steht für 5 kt, ein langer Strich für 10 kt, und ein Dreieck (kommt in Abbildung 7 nicht vor) steht für 50 kt [12]. Die roten Pfeile geben die Ausbreitungsrichtung der Dünung an. Außerdem enthält die Karte Angaben über den Luftdruck [hPa] in Meeresspiegelhöhe sowie die dazugehörigen Isobaren (=Linien gleichen Druckes).

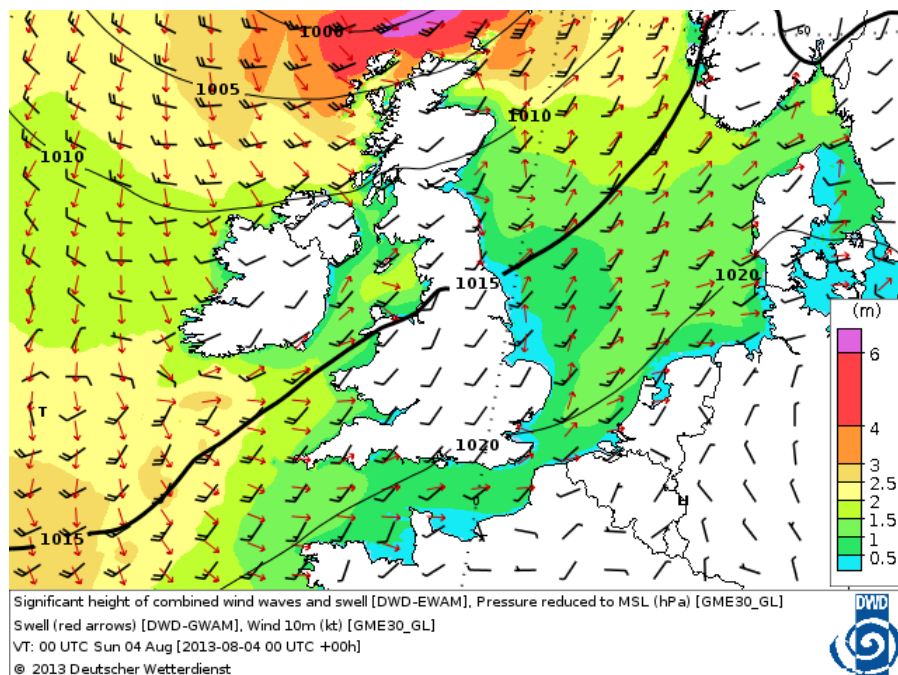


Abbildung 7 Vorhersagekarte für Wind und Seegang

Quelle: [13]

JONSWAP-Spektrum

In den letzten Jahren wurde das JONSWAP-Spektrum zum wichtigsten Seegangsspektrum, insbesondere für den Bereich Konstruktion und Entwicklung sowie für Laborexperimente mit unregelmäßigen Wellen [10]. Das JONSWAP-Spektrum (s. Gleichung (2.23) und Abbildung 8) ist aus insgesamt 10-wöchigen Messungen in der Zeit von 1968 bis 1969 im Zuge des Joint North Sea Wave Project entstanden [14]. Die Messungen wurden dabei entlang eines Profils, „das sich 160 km weit seewärts westlich Sylt in die Nordsee hinaus erstreckte“ ([14], S. 7), bei stationären ablandigen Winden durchgeführt [14]. Damit war der Fetch durch die Entfernung der einzelnen Messstationen von der Küste begrenzt.

Das wichtigste Ergebnis dieses Projektes war die Erkenntnis, dass die Form des Spektrums primär durch den nichtlinearen Energietransport bestimmt wird, der von der Mitte des Spektrums aus sowohl zu kürzeren als auch zu längeren Wellenkomponenten hin stattfindet [14]. Der ausgeprägte schmale Peak und der steile Anstieg an der Vorderseite des Spektrums werden als ein selbststabilisierendes Merkmal dieses Prozesses verstanden [14]. Der steile Anstieg der Vorderseite des Spektrums wird darüber hinaus auch auf den starken Einfluss des nichtlinearen Energietransports zu längeren Wellen zurückgeführt [14]. Aufgrund dieser ausgeprägten Spitzigkeit (engl.: *peakedness*) enthält die mathematische Formulierung des JONSWAP-Spektrums (Gleichung (2.23), [14]) den Faktor γ , der als Verstärkungsfaktor des Peaks fungiert. Für das mittlere JONSWAP-Spektrum wird ein Wert von $\gamma = 3,3$ verwendet [14]. Daneben verfügt das JONSWAP-Spektrum gegenüber früheren Spektren über eine weitere Besonderheit. Neben der Windgeschwindigkeit U_{10} (zehn Meter über dem mittleren Wasserspiegel) fließt auch der Fetch F in die

Berechnungen mit ein. Damit wird nicht, wie sonst üblich, von einem vollausgebildeten Seegang ausgegangen, sondern auch dessen Entstehungsprozess berücksichtigt. Der Faktor α (Gleichung (2.24)) sorgt beim JONSWAP-Spektrum dafür, dass die Wellen mit zunehmendem Fetch bzw. mit zunehmender Windeinwirkdauer größer werden [2]. Mit Gleichung (2.25) wird der dimensionslose Fetch x berechnet [14]. Die Frequenz f_p in Gleichung (2.26) wird Peak-Frequenz genannt. Sie ist die Frequenz, bei der der Peak des Spektrums erreicht wird [14]. Für die Berechnung des Spektrums nach Gleichung (2.23) sind nach den Gleichungen (2.27) und (2.28) in Abhängigkeit von der betrachteten Frequenz f unterschiedliche Werte für die Standardabweichung der Frequenzen σ zu verwenden [14]. Die Standardabweichungen σ_a und σ_b bestimmen zusammen mit γ die Form des Spektrums und werden daher auch als Formparameter bezeichnet [14]. Für unterschiedliche Werte von γ werden auch unterschiedliche Werte für σ_a und σ_b verwendet (vgl. [14], S. 47).

$$S_{\zeta}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \cdot f^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right)} \quad (2.23)$$

mit:

$$\alpha = 0,076 x^{-0,22} \quad (2.24)$$

$$x = g F U_{10}^{-2} \quad (2.25)$$

$$f_p = \frac{3,5 g x^{-0,33}}{U_{10}} \quad (2.26)$$

$$\sigma = \sigma_a = 0,07 \quad \text{für} \quad f \leq f_p \quad (2.27)$$

$$\sigma = \sigma_b = 0,09 \quad \text{für} \quad f > f_p \quad (2.28)$$

Aus den mehr als 2000 gemessenen Spektren wurden 121 als „ideal“ cases“ ([14], S. 27) bezeichnete Spektren aufgrund der ihnen zugrunde liegenden stationären homogenen Windbedingungen ausgewählt, auf deren Grundlage die Modellfunktion in Gleichung (2.23) ermittelt wurde [14]. Aus diesen 121 Fällen wurden später per Zufall fünf Spektren ausgewählt, um die Repräsentativität der ermittelten Funktion nachzuweisen [14]. Für diese fünf Fälle stehen auch detaillierte Informationen zur Verfügung (vgl. [14], S. 47). Die aus diesen Angaben ermittelten Mittelwerte für den Fetch ($F = 13300 \text{ m}$) und die Windgeschwindigkeit ($U_{10} = 8.94 \text{ m/s}$) wurden zusammen mit den für „Mean JONSWAP“ (vgl. [14], S. 47) gültigen Formparametern ($\gamma = 3,3$; $\sigma_a = 0,07$ und $\sigma_b = 0,09$) verwendet, um den in Abbildung 8 gezeigten MatLab-Plot zu erstellen. Die Lage der Peakfrequenz f_p wurde in Abbildung 8 markiert. Nach Gleichung (2.26) ergibt sich für dieses Beispiel ein Wert von $f_p \approx 0.3343 \text{ Hz}$.

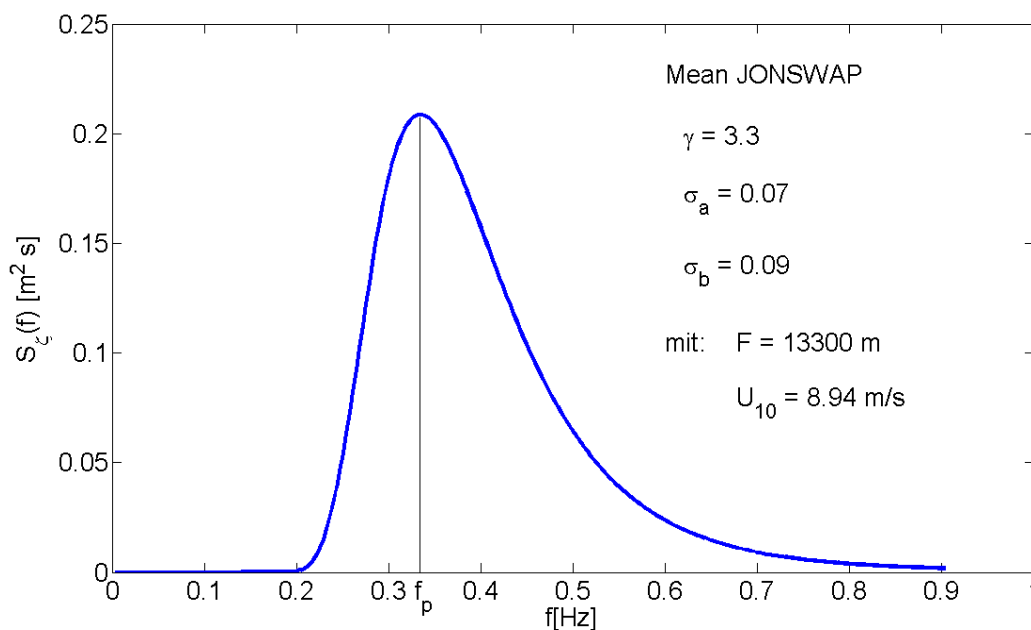


Abbildung 8 MatLab-Plot des mittleren JONSWAP-Spektrums

Die Kurve des Spektrums verschiebt sich für größere Windlaufängen F und für größere Windgeschwindigkeiten U_{10} nach links, d.h. zu geringeren Frequenzen. Das bedeutet, dass die Wellenlängen mit zunehmendem Fetch und mit zunehmender Windgeschwindigkeit größer werden. Die Lage des Peaks ändert sich entsprechend. Gleichzeitig nimmt die Peak-Höhe zu. Da es sich bei $S_z(f)$ um das Energiedichtespektrum des Seegangs handelt (vgl. 2.1.7), enthalten und transportieren Wellen mit Frequenzen im Bereich der Peakfrequenz f_p die größte Wellenenergie E (vgl. Gleichung (2.14)). Die langwelligen Komponenten des Spektrums enthalten den überwiegenden Anteil der Wellenenergie. Dies ist daran zu erkennen, dass der Peak nicht in der Mitte des Spektrums liegt, sondern links davon.

2.2 Schiffsbewegung

In diesem Kapitel werden zunächst in Abschnitt 2.2.1 die einzelnen Komponenten der Schiffsbewegung benannt. Anschließend werden in Abschnitt 2.2.2 die verwendeten Koordinatensysteme betrachtet, bevor in 2.2.3 die Anregungsfrequenz der welleninduzierten Schiffsbewegung vorgestellt wird. Danach werden die Komponenten der welleninduzierten Schiffsbewegung in Abschnitt 2.2.4 genauer betrachtet und eine Linearisierung zur Vereinfachung erforderlicher Koordinatentransformationen vorgenommen. Darauf folgt in Abschnitt 2.2.5 eine Herleitung der allgemeinen linearen Bewegungsgleichungen der Schiffsbewegung, bevor in 2.2.6 ergänzend dazu auch auf die Kopplungen zwischen den Bewegungskomponenten eingegangen wird. Schließlich wird in Abschnitt 2.2.7 am Beispiel einer Bewegungskomponente erläutert, wie das Verhalten eines Schiffes in unregelmäßigen Wellen bestimmt werden kann.

2.2.1 Komponenten der Schiffsbewegung

Alle Bewegungen, die ein Schiff im Wasser ausführen kann, können als Kombination aus drei Translationen (x, y, z) seines Schwerpunkts (CG: *centre of gravity*) und drei Rotationen (Φ, θ, ψ) um CG beschrieben werden [1]. Ihre Namen sind in Tabelle 1 definiert.

	Translationen	Rotationen
x-Achse	Wogen (Surge) x	Rollen (Roll) ϕ
y-Achse	Schwoien (Sway) y	Stampfen (Pitch) θ
z-Achse	Tauchen (Heave) z	Gieren (Yaw) ψ

Tabelle 1 Translationen und Rotationen der Schiffsbewegung

Die Bewegungskomponenten beziehen sich alle auf die Koordinatenachsen des Schiffes, welche mit x_b , y_b und z_b bezeichnet werden und deren Lage in Abbildung 9 dargestellt ist [1]. Die Koordinatenachsen zeigen die positiven Richtungen der Translationen an. Die Rotationen um die Achsen sind positiv nach rechts drehend definiert [1]. Man schaut dabei vom Koordinatenursprung aus in positive Achsrichtung.

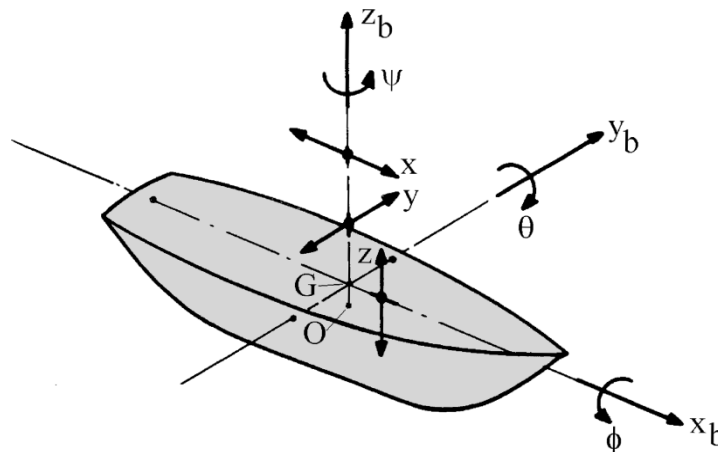


Abbildung 9 Die sechs Freiheitsgrade der Schiffsbewegung

Quelle: [1], S. 32

2.2.2 Koordinatensysteme

Zur Beschreibung der Schiffsbewegungen werden drei verschiedene Koordinatensysteme verwendet [1]. Es handelt sich bei allen dreien um rechtshändige orthogonale Koordinatensysteme [1].

- Beim **erdfesten Koordinatensystem** (engl.: *earth-bound*) $S(x_0, y_0, z_0)$ liegt die (x_0, y_0) -Ebene auf der glatten, d.h. ruhenden Wasseroberfläche. Die positive x_0 -Richtung zeigt in Ausbreitungsrichtung der Wellen und die z_0 -Achse ist positiv nach oben definiert. Wenn der Winkel μ zwischen der Fahrtrichtung des Schiffes und der Ausbreitungsrichtung der Wellen Null ist, dann zeigen die Koordinatenachsen des erdfesten Koordinatensystems und des hydrodynamischen Koordinatensystems in

die gleiche Richtung [1]. Das erdfeste System wird verwendet, um die Bewegung des Schiffes oder der Wellen gegenüber der Erde zu beschreiben.

- Das **körperfeste Koordinatensystem** (engl.: *body-bound*) $G(x_b, y_b, z_b)$ ist fest mit dem Schiff verbunden und sein Ursprung G liegt in dessen Schwerpunkt CG. Die x_b -Achse ist gleichzeitig die Längsachse des Schiffes und positiv nach vorn definiert. Die positive Richtung der y_b -Achse zeigt nach Backbord (engl. *port*), d.h. bei Blick in positive x_b -Richtung nach links. Die z_b -Achse ist positiv nach oben definiert. Wenn das Schiff bei glatter Wasseroberfläche aufrecht im Wasser liegt, ist die (x_b, y_b) -Ebene parallel zu dieser [1]. Im körperfesten System sind einzelne Punkte des Schiffes definiert.
- Das **hydrodynamische Koordinatensystem** $O(x, y, z)$ bewegt sich mit konstanter Schiffsgeschwindigkeit V in Fahrtrichtung des Schiffes mit diesem mit. Aufgrund dieser Translationsbewegung wird es im Englischen auch als *steadily translating system* bezeichnet. In diesem System sind die hydrodynamischen Kräfte und Momente definiert [15]. Wenn sich das Schiff nicht bewegt, d.h. bei glatter Wasseroberfläche und $V = 0$, dann zeigen die Achsen des hydrodynamischen und des körperfesten Koordinatensystems in die gleiche Richtung. Die (x, y) -Ebene liegt auf der ruhenden Wasseroberfläche und der Koordinatenursprung O liegt auf, über oder unter dem zeitlichen Mittelwert der Position des Schwerpunkts CG. Es wird angenommen, dass das Schiff bei Seegang Schwingungen um das hydrodynamische Koordinatensystem $O(x, y, z)$ herum ausführt [1].

Die drei beschriebenen Koordinatensysteme und deren relative Lage zueinander sind in Abbildung 10 dargestellt.

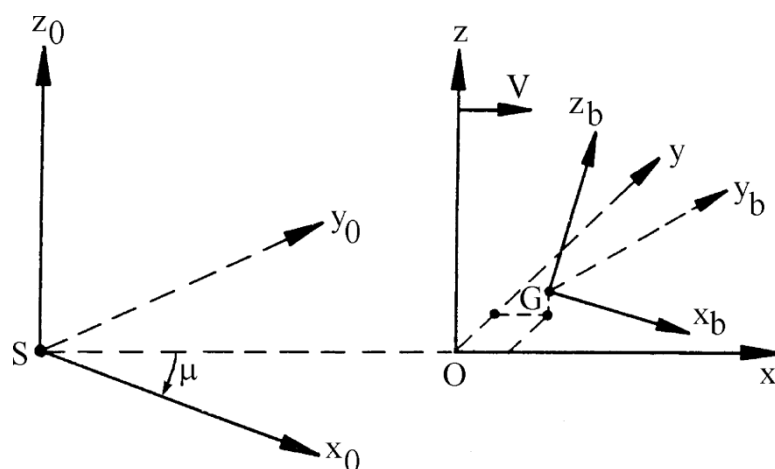


Abbildung 10 Koordinatensysteme zur Beschreibung von Schiffsbewegungen

Quelle: [1], S. 33

2.2.3 Begegnungskreisfrequenz zwischen Schiff und Wellen

Für die Bestimmung der Auslenkungen der Translationen und Rotationen des Schiffes infolge regelmäßiger harmonischer Wellen wird zunächst die Frequenz benötigt, mit der sich das Schiff und die Wellen begegnen (s. Abbildung 11).

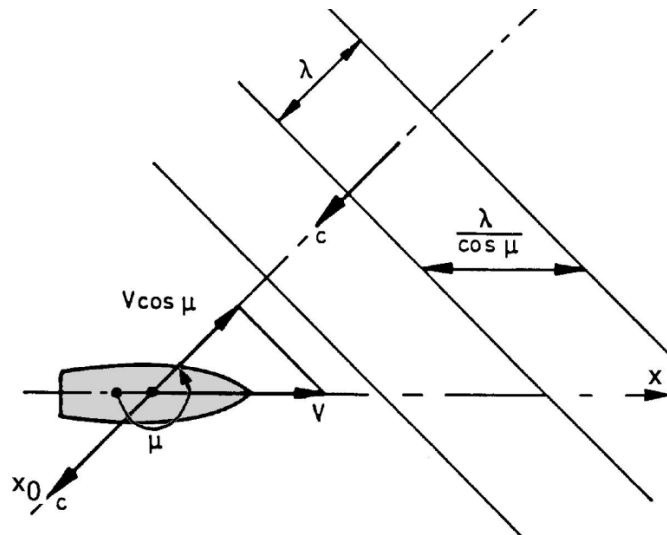


Abbildung 11 Begegnungskreisfrequenz zwischen Schiff und Wellen

Quelle: [1], S. 34

Diese Frequenz wird Begegnungskreisfrequenz (engl.: *frequency of encounter*) genannt und mit ω_e bezeichnet [1] (s. Gleichung (2.29)). Der Winkel μ gibt die auf den Vektor der Schiffsgeschwindigkeit V bezogene Richtung der Wellenausbreitung an.

$$\omega_e = \frac{2\pi(c - V \cos \mu)}{\lambda} = k(c - V \cos \mu) \quad (2.29)$$

Aus Gleichung (2.30) entsteht zusammen mit $k \cdot c = \omega$ aus Gleichung (2.5) folgende Beziehung zwischen der Begegnungskreisfrequenz ω_e und der Wellenkreisfrequenz ω [1]:

$$\omega_e = \omega - k V \cos \mu \quad (2.30)$$

Ohne Vorwärtsgeschwindigkeit ($V = 0$) oder bei seitlichen Wellen ($\mu = 90^\circ$ oder $\mu = 270^\circ$) ist die Begegnungskreisfrequenz ω_e gleich der Wellenkreisfrequenz ω [1].

2.2.4 Translationen und Rotationen infolge harmonischer Wellen

Die Auslenkungen der drei Translationen und der drei Rotationen der aus der Begegnung mit harmonischen Wellen entstehenden Schiffsbewegung sind im hydrodynamischen Koordinatensystem $O(x, y, z)$ nach den Gleichungen (2.31) bis (2.36) definiert [1]. Der Index a kennzeichnet die Amplituden dieser Auslenkungen. Die α -Werte stehen jeweils für unterschiedliche Phasenwinkel.

$$\text{Wogen:} \quad x = x_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{x\zeta}) \quad (2.31)$$

$$\text{Schwoien:} \quad y = y_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{y\zeta}) \quad (2.32)$$

$$\text{Tauchen:} \quad z = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{z\zeta}) \quad (2.33)$$

$$\text{Rollen:} \quad \phi = \phi_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\phi\zeta}) \quad (2.34)$$

$$\text{Stampfen:} \quad \theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\theta\zeta}) \quad (2.35)$$

$$\text{Gieren:} \quad \psi = \psi_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\psi\zeta}) \quad (2.36)$$

Aus den Gleichungen (2.31) bis (2.36) können für alle sechs Freiheitsgrade die entsprechenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als erste und zweite Ableitungen der Auslenkungen bestimmt werden. Aufgrund der zulässigen Annahme kleiner Lagewinkel ϕ , θ und ψ [rad] ist mit Gleichung (2.37) folgende Linearisierung möglich [1]:

$$\sin \beta \approx \beta \text{ und } \cos \beta \approx 1.0 \quad (2.37)$$

Darin wurde β stellvertretend für die Lagewinkel ϕ , θ und ψ verwendet. Die Linearisierung wirkt sich stark vereinfachend auf die Transformationsmatrizen aus, wie am Beispiel einer Transformation von Schiffskoordinaten vom körperfesten Koordinatensystem $G(x_b, y_b, z_b)$ in das hydrodynamische Koordinatensystem $O(x, y, z)$ gut zu erkennen ist (s. Gleichungen (2.38) und (2.39)).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \cos \theta \\ -\cos \phi \sin \psi & +\cos \phi \cos \psi & \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \theta \\ +\sin \phi \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & \psi & -\theta \\ -\psi & 1 & \phi \\ \theta & -\phi & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Zusammen mit den Ergebnissen aus den Gleichungen (2.31) bis (2.36) lassen sich dann mit Hilfe von Gleichung (2.39) die aus den harmonischen Wellenbewegungen resultierenden Bewegungskomponenten für bestimmte Punkte des Schiffes relativ einfach bestimmen [1]. Die Transformation ist erforderlich, da die resultierenden absoluten harmonischen Bewegungen im hydrodynamischen Koordinatensystem $O(x, y, z)$ definiert sind [1].

Die absolute harmonische Bewegung des Schiffes hängt neben den aus den Wellenbewegungen resultierenden Kräften und Momenten auch von seinen hydrodynamischen

Eigenschaften ab. Sie kann daher auch als Superposition der welleninduzierten Komponenten mit den hydromechanischen Kräften und Momenten interpretiert werden (s. Abbildung 12) [1]. Voraussetzung dafür, dass diese verschiedenen Einflüsse superponiert werden dürfen, ist, dass sich die Schiffsbewegung (Systemantwort) linear zur Wellenbewegung (Anregung) verhält. Das Schiff selbst fungiert dabei als lineares Übertragungssystem. Für die in Abbildung 12 dargestellte Superposition wird angenommen, dass die hydromechanischen Kräfte und Momente durch die harmonische Bewegung des Starrkörpers in der ungestörten Wasseroberfläche hervorgerufen werden [1]. Für die welleninduzierten Kräfte und Momente wird angenommen, dass diese durch Wellen entstehen, die auf einen eingespannten Körper wirken [1]. Die beiden unterschiedlichen Einflüsse auf die Schiffsbewegung werden also zunächst getrennt voneinander betrachtet und anschließend superponiert.

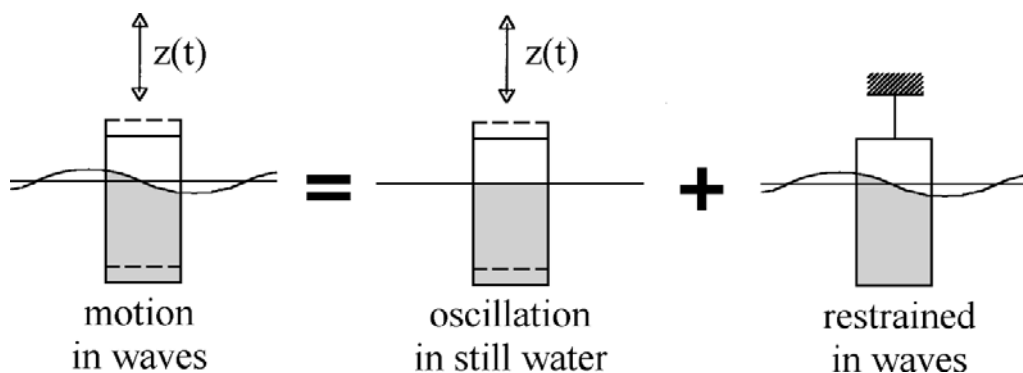


Abbildung 12 Superposition von hydromechanischen und welleninduzierten Lasten

Quelle: [1], S. 39

2.2.5 Bewegungsgleichungen

Aus dem Superpositionsprinzip (vgl. Abbildung 12) und dem zweiten Newtonschen Gesetz ergeben sich die sechs Bewegungsgleichungen für die Komponenten der Schiffsbewegung (Gleichungen (2.40) bis (2.45)) jeweils als Summe der hydromechanischen und welleninduzierten Kräfte bzw. Momente [11]. Darin stehen auf der linken Seite die Kräfte und Momente, die die Bewegung des Schiffes beschreiben. Auf der rechten Seite stehen mit X_{hi} die hydromechanischen Kräfte ($i = 1 \dots 3$) und Momente ($i = 4 \dots 6$), die durch die Oszillationen des Starrkörpers auf der ruhenden Wasseroberfläche entstehen sowie mit X_{wi} die Kräfte und Momente der Wellenanregung auf den eingespannten Starrkörper (vgl. Abbildung 12). Aufgrund von Kopplungseffekten stehen F_1 bis F_3 für die Summen der Kräfte, die in Richtung der jeweiligen Achse wirken und F_4 bis F_6 für die Summen der Momente um die Achsen. In den Gleichungen werden außerdem die Dichte von Meerwasser ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$) sowie das Verdrängungsvolumen des Schiffes $\nabla [\text{m}^3]$ verwendet. X_{hi} und X_{wi} stehen für die hydromechanischen (Index h) und die welleninduzierten (Index w) Kräfte $[N]$ in Achsrichtung und die Momente $[Nm]$ um die Achsen.

Bei I_{xx} , I_{xz} , I_{yy} , I_{zz} und I_{zx} handelt es sich um die Massenträgheitsmomente des Schiffes [$kg\ m^2$]. Der erste Index bezieht sich auf die Achse, um die das Moment wirkt und der zweite Index gibt die Ursache bzw. Herkunft der Komponenten an. Bei I_{xz} handelt es sich somit zum Beispiel um ein Rollmoment (= Moment um die x-Achse), das durch eine Gierbeschleunigung (= Drehbeschleunigung um die z-Achse) hervorgerufen wird.

$$\text{Wogen:} \quad F_1 = \rho \nabla \cdot \ddot{x} = X_{h_1} + X_{w_1} \quad (2.40)$$

$$\text{Schwoien:} \quad F_2 = \rho \nabla \cdot \ddot{y} = X_{h_2} + X_{w_2} \quad (2.41)$$

$$\text{Tauchen:} \quad F_3 = \rho \nabla \cdot \ddot{z} = X_{h_3} + X_{w_3} \quad (2.42)$$

$$\text{Rollen:} \quad F_4 = I_{xx} \cdot \ddot{\phi} - I_{xz} \cdot \ddot{\psi} = X_{h_4} + X_{w_4} \quad (2.43)$$

$$\text{Stampfen:} \quad F_5 = I_{yy} \cdot \ddot{\theta} = X_{h_5} + X_{w_5} \quad (2.44)$$

$$\text{Gieren:} \quad F_6 = I_{zz} \cdot \ddot{\psi} - I_{zx} \cdot \ddot{\phi} = X_{h_6} + X_{w_6} \quad (2.45)$$

Bei bekannter Masse und Massenverteilung des Schiffes, welche als konstant angenommen werden [16], ergeben sich die allgemeinen linearen Bewegungsgleichungen für die sechs Freiheitsgrade nach den Gleichungen (2.46), (2.47) und (2.48) [11]. Bei $m_{i,j}$ handelt es sich um eine 6x6-Matrix, welche die schweren und trägen Massen enthält [11]. Mit \ddot{x}_j , \dot{x}_j und x_j werden die Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Auslenkungen in der j-ten Richtung bezeichnet [11]. Die Koeffizienten $a_{i,j}$ und $b_{i,j}$ beschreiben zusammen mit den Beschleunigungen und Geschwindigkeiten die linearen hydrodynamischen Reaktionskräfte und -momente und erfüllen in diesem Zusammenhang die Funktion der hydrodynamischen Massen und der Dämpfungskonstanten [11]. Sie sind abhängig von der Form des Schiffes, dessen Vorwärtsgeschwindigkeit und der Bewegungsfrequenz des jeweiligen Freiheitsgrades [16]. Die Koeffizienten $c_{i,j}$ stellen zusammen mit den Auslenkungen x_j die linearen hydrostatischen Rückstellkräfte und -momente dar und haben die Funktion von Federkonstanten [11]. Im Unterschied zu den hydrodynamischen Koeffizienten $a_{i,j}$ und $b_{i,j}$ sind die hydrostatischen Koeffizienten $c_{i,j}$ nur von der Form des Schiffes abhängig [16]. In den Gleichungen (2.47) und (2.48) werden die Koeffizienten vereinfachend nur als Funktionen der Begegnungskreisfrequenz ω_e betrachtet. Der zweite Index wird bei den Koeffizienten benötigt, da es zu Kopplungen zwischen den verschiedenen Bewegungskomponenten kommt. Der Index i steht daher für die Wirkungsrichtung der Kräfte und der Index j kennzeichnet deren Herkunft [16]. Der vierte Summand in Gleichung (2.47) bzw. die rechte Seite von Gleichung (2.48) enthalten die welleninduzierten Kräfte F_{w_i} mit den Amplituden F_{wa_i} .

$$F_i = \sum_{j=1}^6 m_{i,j} \cdot \ddot{x}_j \quad (2.46)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^6 \{ -a_{i,j}(\omega_e) \cdot \ddot{x}_j(\omega_e, t) - b_{i,j}(\omega_e) \cdot \dot{x}_j(\omega_e, t) - c_{i,j}(\omega_e) \cdot x_j(\omega_e, t) + F_{wa_i}(\omega_e) \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon_i(\omega_e)) \} \quad (2.47)$$

$$\sum_{j=1}^6 \{ m_{i,j} + a_{i,j}(\omega_e) \cdot \ddot{x}_j(\omega_e, t) + b_{i,j}(\omega_e) \cdot \dot{x}_j(\omega_e, t) + c_{i,j}(\omega_e) \cdot x_j(\omega_e, t) \} = F_{wa_i}(\omega_e) \cdot \cos(\omega_e t + \epsilon_i(\omega_e)) \quad (2.48)$$

2.2.6 Kopplungen der Bewegungen

Aufgrund der Symmetrie von Schiffen in der vertikalen Längsebene können die Bewegungen in symmetrische und unsymmetrische Komponenten aufgeteilt werden [11]. Die Bewegungen, denen die durch die vertikale Längsebene gewährten Freiheitsgrade genügen, stellen die symmetrischen Komponenten dar. Dies sind Wogen (x), Tauchen (z) und Stampfen (θ). Die Bewegungen Schwoien (y), Rollen (ϕ) und Gieren (ψ) sind damit die unsymmetrischen Komponenten. Symmetrische und unsymmetrische Komponenten beeinflussen sich nicht gegenseitig, d.h. sie sind nicht miteinander gekoppelt [11]. Jedoch sind die symmetrischen und die unsymmetrischen Bewegungskomponenten jeweils untereinander verkoppelt (s. Gleichungen (2.49) bis (2.54)) [11]. So besteht beispielsweise die Tauchbewegung in Gleichung (2.50) aus einem Anteil der Translation in x-Richtung (Wogen), der eigentlichen Tauchbewegung selbst (Anteil in z-Richtung) und einem Anteil aus der Stampfbewegung (θ : Rotation um die y-Achse).

Symmetrische Bewegungskomponenten:

$$\begin{aligned}
 \text{Wogen:} \quad & (\rho \nabla + a_{11}) \cdot \ddot{x} & + b_{11} \cdot \dot{x} & + c_{11} \cdot x \\
 & + a_{13} \cdot \ddot{z} & + b_{13} \cdot \dot{z} & + c_{13} \cdot z \\
 & + a_{15} \cdot \ddot{\theta} & + b_{15} \cdot \dot{\theta} & + c_{15} \cdot \theta & = X_{w_1}
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tauchen:} \quad & a_{31} \cdot \ddot{x} & + b_{31} \cdot \dot{x} & + c_{31} \cdot x \\
 & + (\rho \nabla + a_{33}) \cdot \ddot{z} & + b_{33} \cdot \dot{z} & + c_{33} \cdot z \\
 & + a_{35} \cdot \ddot{\theta} & + b_{35} \cdot \dot{\theta} & + c_{35} \cdot \theta & = X_{w_3}
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Stampfen:} \quad & a_{51} \cdot \ddot{x} & + b_{51} \cdot \dot{x} & + c_{51} \cdot x \\
 & + a_{53} \cdot \ddot{z} & + b_{53} \cdot \dot{z} & + c_{53} \cdot z \\
 & + (I_{yy} + a_{55}) \cdot \ddot{\theta} & + b_{55} \cdot \dot{\theta} & + c_{55} \cdot \theta & = X_{w_5}
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

Unsymmetrische Bewegungskomponenten:

$$\begin{aligned}
 \text{Schwoien:} \quad & (\rho \nabla + a_{22}) \cdot \ddot{y} & + b_{22} \cdot \dot{y} & + c_{22} \cdot y \\
 & + a_{24} \cdot \ddot{\phi} & + b_{24} \cdot \dot{\phi} & + c_{24} \cdot \phi \\
 & + a_{26} \cdot \ddot{\psi} & + b_{26} \cdot \dot{\psi} & + c_{26} \cdot \psi & = X_{w_2}
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rollen:} \quad & a_{42} \cdot \ddot{y} & + b_{42} \cdot \dot{y} & + c_{42} \cdot y \\
 & + (I_{xx} + a_{44}) \cdot \ddot{\phi} & + b_{44} \cdot \dot{\phi} & + c_{44} \cdot \phi \\
 & + (-I_{xz} + a_{46}) \cdot \ddot{\psi} & + b_{46} \cdot \dot{\psi} & + c_{46} \cdot \psi & = X_{w_4}
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gieren:} \quad & a_{62} \cdot \ddot{y} & + b_{62} \cdot \dot{y} & + c_{62} \cdot y \\
 & + (-I_{zx} + a_{64}) \cdot \ddot{\phi} & + b_{64} \cdot \dot{\phi} & + c_{64} \cdot \phi \\
 & + (I_{zz} + a_{66}) \cdot \ddot{\psi} & + b_{66} \cdot \dot{\psi} & + c_{66} \cdot \psi & = X_{w_6}
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

Die Koeffizienten $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ und $c_{i,j}$ mit $i = 2, 4, 6$ und $j = 1, 3, 5$ sowie diejenigen mit $i = 1, 3, 5$ und $j = 2, 4, 6$ tauchen in den Gleichungen nicht auf, da sie aufgrund der Symmetrie in der vertikalen Längsebene Null sind. Grundsätzlich sind die Koeffizienten $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ und $c_{i,j}$ für jedes Schiff unterschiedlich, da sie von dessen Form und weiteren Faktoren abhängig sind (vgl. 2.2.5). Eine Näherungslösung für die Koeffizienten eines mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Schiffes in regelmäßigen Wellen erhält man zum Beispiel durch das in [16] beschriebene dreistufige Verfahren. Jedoch treten bei Berücksichtigung der Geschwindigkeit (dritte Stufe des Verfahrens) quantitative Fehler auf, die mit steigender Geschwindigkeit und steigender Bewegungsfrequenz größer werden [16]. In [17] und [11] werden weitere Methoden zur experimentellen (Modellversuche) und rechnerischen Ermittlung der Koeffizienten vorgestellt. Die 3D Panel-Methode, welche eine Form der Randelementmethode (engl.: *boundary element method*, BEM) darstellt, basiert auf der

Potentialtheorie und wird in [11] genauer beschrieben. Vergleichbare Panelverfahren kommen auch in der kommerziellen Software WAMIT (Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology) zum Einsatz, mit der unter anderem auch die hydromechanischen Koeffizienten $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ und $c_{i,j}$ für beliebige Schiffsmodelle berechnet werden können [18]. Die verschiedenen Varianten der Panelmethoden wie auch die Software WAMIT sind jedoch auf nicht fahrende Schiffe beschränkt [11], [17].

Wenn alle Koeffizienten vorliegen, lassen sich die sechs Bewegungskomponenten nach den Gleichungen (2.49) bis (2.54) berechnen. Die dafür benötigten Auslenkungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ergeben sich aus den Gleichungen (2.31) bis (2.36) und deren ersten und zweiten Ableitungen. Die Superposition der Ergebnisse für die Bewegungskomponenten aus den Gleichungen (2.49) bis (2.54) beschreibt die Gesamtbewegung des Schiffes unter Berücksichtigung aller relevanten Kräfte und Momente.

2.2.7 Verhalten in unregelmäßigen Wellen

Das Bewegungsverhalten eines Schiffes in unregelmäßigen Wellen lässt sich auf der Grundlage der Übertragungsfunktionen (engl.: RAO: *Response Amplitude Operator*) zwischen den in den Gleichungen (2.31) bis (2.36) beschriebenen Bewegungskomponenten des Schiffes und der Wasserspiegelauslenkung sowie des Wellenenergiespektrums des vorherrschenden Seegangs beschreiben. Das nachfolgende Beispiel bezieht sich auf die Tauchbewegung des Schiffes (vgl. Tabelle 1). Die beschriebene Vorgehensweise kann jedoch auch für die anderen Bewegungskomponenten der Schiffsbewegung angewendet werden.

Aus der Übertragungsfunktion der Amplitude der Wasserspiegelauslenkung ζ_a zur Amplitude der Tauchbewegung des Schiffes z_a kann unter Zuhilfenahme des Energiedichtespektrums des vorherrschenden Seegangs $S_\zeta(\omega)$ das Antwortspektrum der Tauchbewegung $S_z(\omega)$ ermittelt werden (s. Gleichung (2.55)) [1].

$$S_z(\omega) = \left| \frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right|^2 \cdot S_\zeta(\omega) \quad (2.55)$$

In Abbildung 13 ist das Prinzip der Transformation der Wellenenergie in eine Komponente der Bewegungsenergie eines Schiffes am Beispiel der Tauchbewegung dargestellt. Der linke Teil von Abbildung 13 zeigt, analog zu Abbildung 6, den Zusammenhang zwischen der Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung, den einzelnen harmonischen Wellen und dem Energiedichtespektrum des Seegangs (vgl. Abschnitt 2.1.7). Jede der harmonischen Komponenten des Seegangs wird nun mit der Übertragungsfunktion $\frac{z_a}{\zeta_a}(\omega)$ multipliziert, um daraus im rechten Teil von Abbildung 13 die resultierende harmonische Komponente der Tauchbewegung zu erhalten [1]. Die Übertragungsfunktion und der Phasenunterschied $\varepsilon_{z\zeta}$ zwischen den harmonischen Komponenten der Wellen und der Tauchbewegung hängen von der Vorwärtsgeschwindigkeit V des Schiffes und dem Winkel μ zwischen der

Ausbreitungsrichtung der Wellen und der Fahrtrichtung des Schiffes ab (vgl. Abbildung 13). Die Summe der harmonischen Komponenten der Tauchbewegung ergibt dann die Zeitreihe der unregelmäßigen Tauchbewegung [1]. Trägt man den Wert $\frac{1}{2}z_a^2(\omega)/\Delta\omega$ für jede harmonische Komponente der Tauchbewegung auf der ω -Achse auf, erhält man das Energiedichtespektrum der Tauchbewegung $S_z(\omega)$ als Antwortspektrum [1].

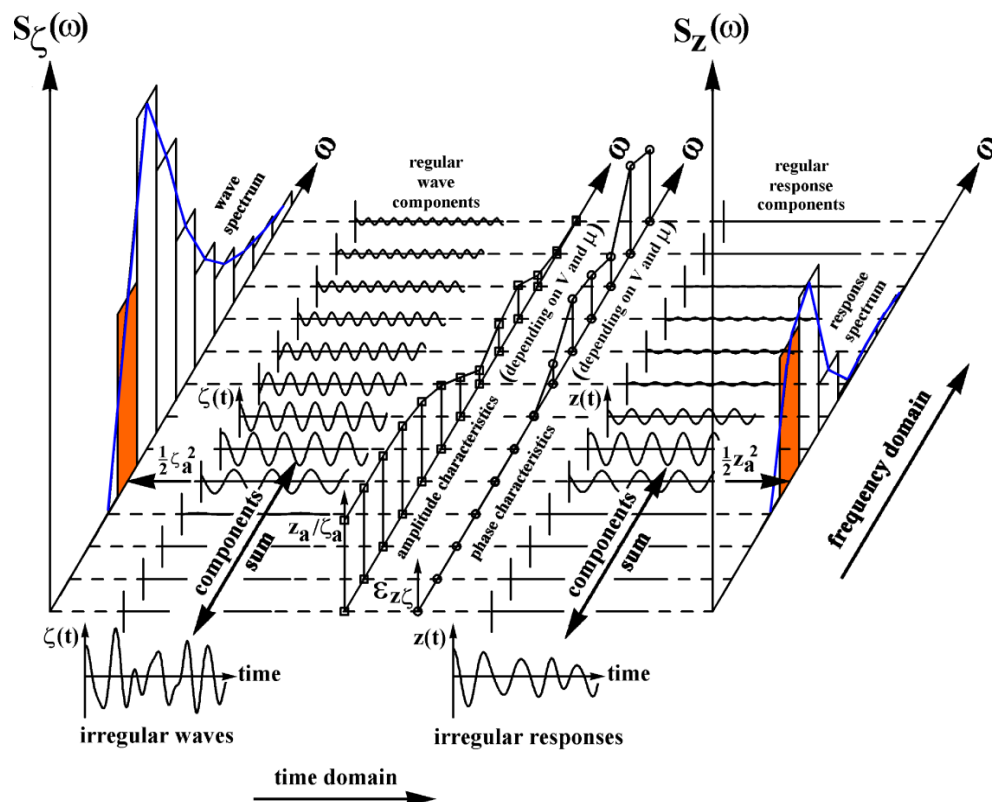


Abbildung 13 Prinzip des Transfers von Wellen- in Schiffsbewegungen

In Anlehnung an: [1], S. 48

2.3 Aerodynamik von Windkraftanlagen

In diesem Abschnitt werden wichtige aerodynamische Eigenschaften sowie wichtige Zusammenhänge zwischen der Aerodynamik und der Regelung von Windkraftanlagen erläutert. Neben den Anströmverhältnissen und Luftkräften an einem Profilquerschnitt eines Rotorblattes bzw. Blattelementes werden die aerodynamische Leistungsregelung und die Windrichtungsnachführung des Rotors betrachtet.

2.3.1 Blattelementtheorie

Bei der Blattelementtheorie werden über die Blattlänge verteilt einzelne Blattelemente betrachtet, die sich im Abstand r um die Rotorachse drehen. Als Vereinfachung gilt die Annahme, dass sich die Luftkräfte der verschiedenen Blattelemente nicht gegenseitig beeinflussen [19]. Des Weiteren wird vereinfachend angenommen, dass innerhalb eines

Blattelementes für alle r die gleichen Bedingungen gelten. Durch Integration der verschiedenen Kräfte aller Blattelemente eines Blattes über die Blattlänge und Summation über die Anzahl der Rotorblätter erhält man die entsprechenden Gesamtkräfte für den Rotor. Für ein aus einem Windkraftanlagen-Rotorblatt herausgeschnittenes Blattelement der Länge Δr ergeben sich die in Abbildung 14 für einen Profilquerschnitt dieses Elementes dargestellten Anströmverhältnisse und Luftkräfte. Aufgrund der Überlagerung der Windgeschwindigkeit v_w und der Drehbewegung des Rotors mit der Kreisfrequenz ω entsteht die effektive Anströmung v_{eff} als Vektorsumme aus der axialen Durchströmung des Rotors v_a und der aus der Drehbewegung resultierenden Anströmung $v_u = r \cdot \omega$. Die axiale Geschwindigkeit v_a beträgt nach der Impulstheorie von Betz bei maximaler Leistungsentnahme zwei Drittel der Windgeschwindigkeit v_w [19]. Der Einstellwinkel ϑ ist der Winkel zwischen der Profilsehne und der Drehebene. In Abbildung 14 ist der Einstellwinkel negativ. Der Anstellwinkel α ist der Winkel zwischen der relativen Anströmung und der Profilsehne. Der Anstellwinkel ist in Abbildung 14 positiv. Die Widerstandskraft F_W wirkt in Richtung der effektiven Anströmung v_{eff} und die Auftriebskraft F_A wirkt senkrecht dazu. Die resultierende Luftkraft F_R ist die Vektorsumme aus diesen beiden Kräften.

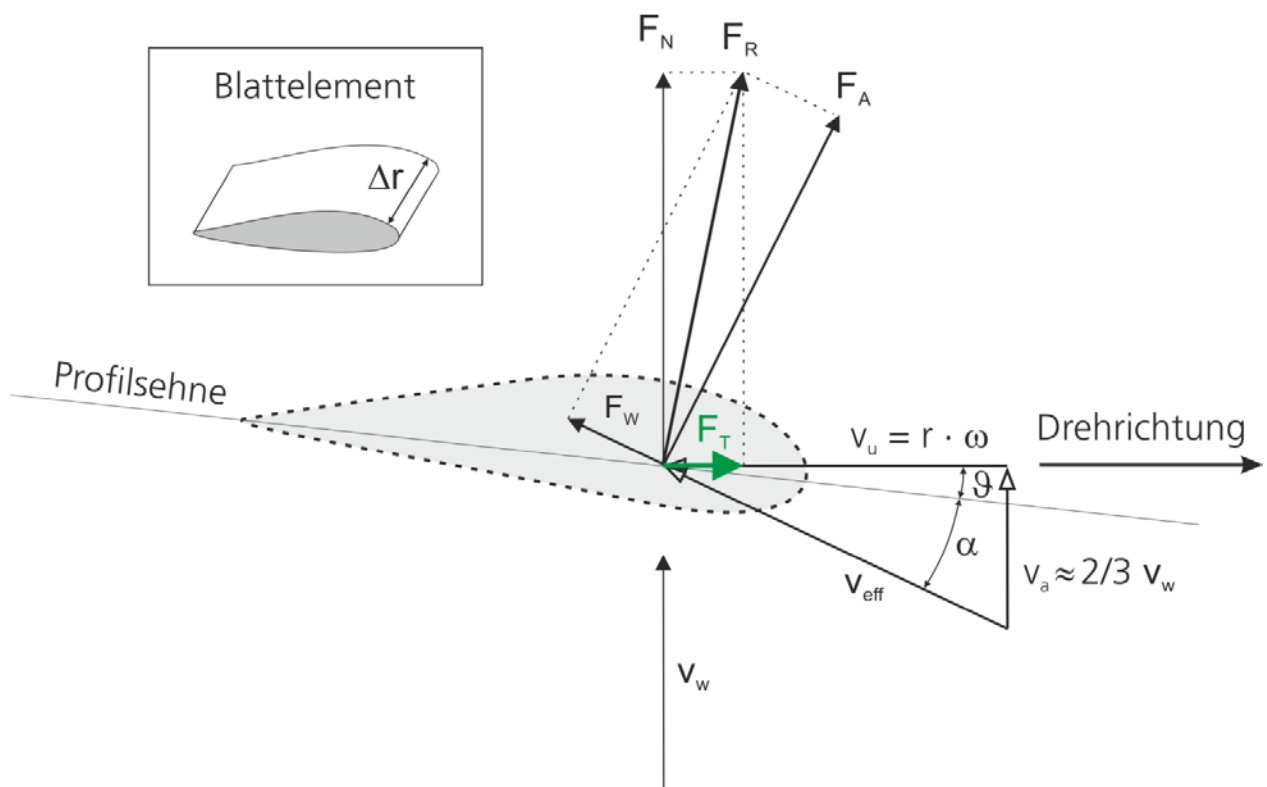


Abbildung 14 Aerodynamik am Profilquerschnitt eines Blattelements

In Anlehnung an: [19], S. 93

Sie lässt sich in eine Komponente in Drehrichtung und eine Komponente senkrecht dazu aufteilen. Es handelt sich dabei um die Normalkraft F_N , welche den Rotorschub darstellt, und um die Tangentialkraft F_T , die den Rotor antreibt, wenn sie, wie in Abbildung 14

dargestellt, in Drehrichtung des Rotors zeigt. Anderenfalls wird die Drehbewegung des Rotors durch die Tangentialkraft gebremst.

2.3.2 Leistungs- und Drehzahlregelung durch Blatteinstellwinkeländerung

Die in Abbildung 14 dargestellte Situation eines durch den Wind angetriebenen Windkraftanlagenrotors ist aerodynamisch vergleichbar mit der Situation eines Hubschrauberrotors bei senkrechter Autorotation im Bereich antreibender Blattelemente. Unterschiedlich sind jedoch die Einstellwinkel der Rotoren. Die Verstellung des Blatteinstellwinkels ist bei fast allen Hubschraubern auf positive Werte beschränkt. Bei Windkraftanlagen dagegen ist die Nutzung negativer Blatteinstellwinkel üblich [19]. Infolge der Verstellung der Blatteinstellwinkel verändern sich auch die Anstellwinkel, wodurch eine Regelung der Leistungsaufnahme des Rotors ermöglicht wird [19]. Durch eine Blatteinstellwinkelveränderung in Richtung kleinerer Anstellwinkel kann die Leistungsaufnahme des Rotors reduziert werden, eine Veränderung in umgekehrte Richtung führt zur Erhöhung der Leistungsaufnahme [19]. Daneben können Blatteinstellwinkeländerungen auch zur Regelung der Rotordrehzahl genutzt werden [19]. Abbildung 15 zeigt, wie sich Änderungen des Einstellwinkels ϑ bei konstanter Drehzahl (da $\omega = \text{const.}$, da $v_u = r \cdot \omega = \text{const.}$) und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten v_w auf die Änderung des Anstellwinkels auswirken. Die Drehzahl wird in diesem Fall durch das Widerstandsmoment des elektrischen Generators und die Dynamik des mechanischen Triebstrangs und des Generatorläufers bestimmt, die unter anderem die Trägheit der rotierenden Massen enthält [19].

Durch eine Erhöhung des Einstellwinkels kann die aerodynamische Leistungsaufnahme des Rotors nach oben begrenzt werden, da die Strömung beim kritischen Anstellwinkel α_{krit} beginnt abzulösen (s. Abbildung 15, rechts). Nach diesem Prinzip funktionieren auch Anlagen ohne Verstellmöglichkeit des Blatteinstellwinkels. Aufgrund des bei konstantem Einstellwinkel mit zunehmender Windgeschwindigkeit größer werdenden Anstellwinkels nimmt die Leistung des Rotors ab einem konstruktiv festgelegten kritischen Windgeschwindigkeitswert nicht weiter zu, d.h. sie ist aerodynamisch begrenzt.

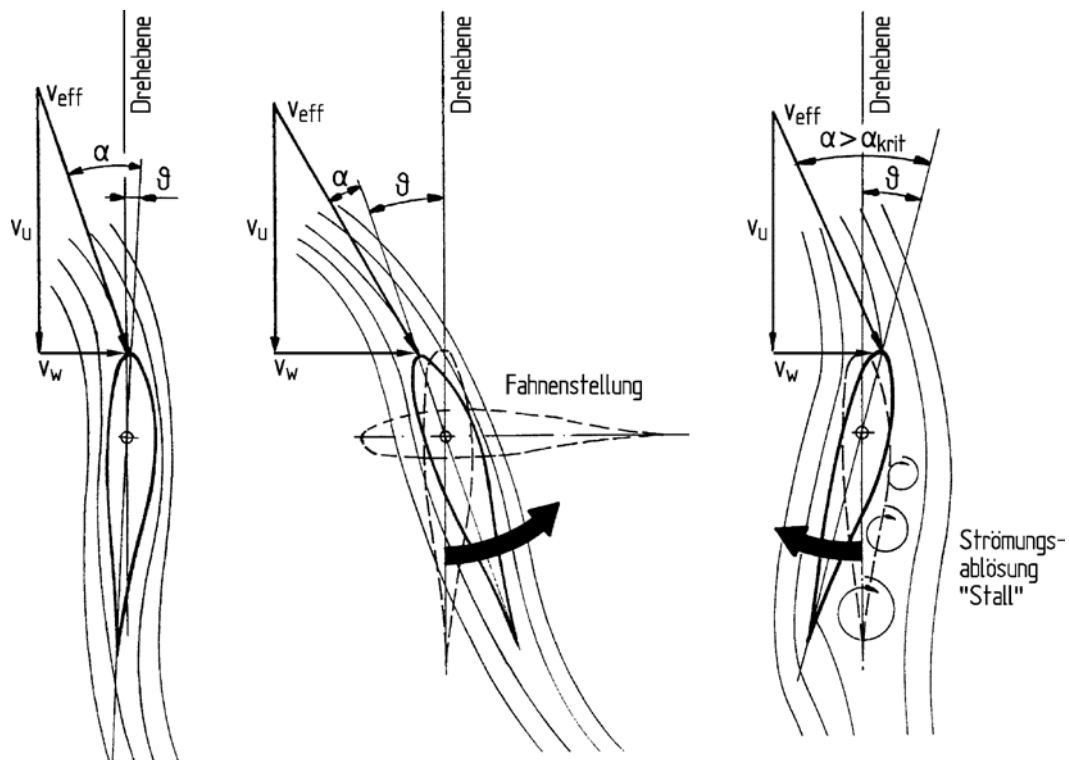


Abbildung 15 Blatteinstellwinkeländerungen zur Leistungsregelung

Quelle: [19], S. 108

Bei veränderbarer Drehzahl würden sich infolge einer Änderung des Anstellwinkels und der daraus resultierenden Änderung der Luftkräfte auch eine Änderung der Drehzahl und damit über v_u auch eine Änderung der Strömungsverhältnisse ergeben. Anstatt der Leistung würde dann die Drehzahl durch Einstellwinkeländerungen geregelt. Bei gleichzeitig konstanter Windgeschwindigkeit würde sich die Drehzahl mit zunehmend negativem Einstellwinkel verringern. Die effektive Anströmung v_{eff} nähert sich bei variabler Drehzahl in Betrag und Richtung immer mehr der in axialer Richtung wirkenden Windgeschwindigkeit v_w an und wird daher immer kleiner, bis sich bei $\vartheta = -90^\circ$ beide Geschwindigkeiten gleichen. Die dabei auftretende Verzögerung der Rotation ist darauf zurückzuführen, dass die Blätter zunehmend quer zur Drehrichtung stehen und dabei einen sehr hohen schädlichen Widerstand erzeugen. Sobald diese entgegen der Drehrichtung wirkende (bremsende) Kraft die in Drehrichtung wirkende (antreibende) Kraft betragsmäßig übersteigt, beginnt sich die Drehzahl zu verringern. Bei $\vartheta = -90^\circ$ sind $\alpha = 0^\circ$ und $v_u = 0$. Der Auftrieb zeigt in Drehrichtung ($F_A = F_T$) und der Widerstand übernimmt die Rolle der Normalkraft ($F_W = F_N$).

Für Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben werden die Rotorblätter einer Windkraftanlage langsam in Richtung Fahnenstellung (vgl. Abbildung 15) gedreht, um den Rotor anzuhalten. Gleiches gilt bei extremen Windgeschwindigkeiten, um die Windlasten auf die Rotorblätter und die gesamte Anlage zu verringern [19]. Bei einer Rotornotabschaltung, die

beispielsweise beim Ausfall des elektrischen Systems (Lastabwurf des Generators) erforderlich wird, werden die Blätter sehr schnell in die Fahnenstellung gefahren, um eine Beschädigung der Anlage infolge eines unkontrollierten Drehzahlanstiegs abzuwenden [19]. Dabei werden sie kurzzeitig mit negativen Anstellwinkeln angeströmt [19].

2.3.3 Windrichtungsnachführung des Rotors

Bei einer Änderung der Windrichtung muss der Rotor nachgeführt werden, um eine Verringerung der senkrecht zur Rotorebene zeigenden Windgeschwindigkeitskomponente bzw. eine daraus resultierende Verkleinerung der auf die Windrichtung bezogenen effektiven Rotorkreisfläche zu vermeiden [19]. Eine Schräganströmung der Rotorebene würde einen deutlichen Abfall der Rotorleistung bewirken [19]. In Abbildung 16 ist der Abfall des Rotorleistungsbeiwertes c_{PR} über der Schnellaufzahl $\lambda = \frac{u}{v_w}$ (u : Blattspitzengeschwindigkeit des Rotors) für verschiedene Gierwinkel zwischen dem Windvektor v_w und der Rotordrehebene dargestellt [19]. Die Windrichtungsnachführung des Rotors erfolgt bei größeren Anlagen zumeist aktiv mit Hilfe eines motorischen Azimutantriebes [19].

Prinzipiell ist es auch möglich, den Rotor samt Generatorgondel mit Hilfe von Windfahnen oder Seitenrädern in den Wind zu drehen [19]. Diese Methoden der aerodynamischen Nachführung wurden bei älteren, überwiegend kleineren Anlagen auch genutzt [19]. Da eine Azimutverstellung jedoch auch unabhängig vom Wind erforderlich sein kann, kommt die aerodynamische Nachführung bei neueren Kleinanlagen kaum noch zur Anwendung [19].

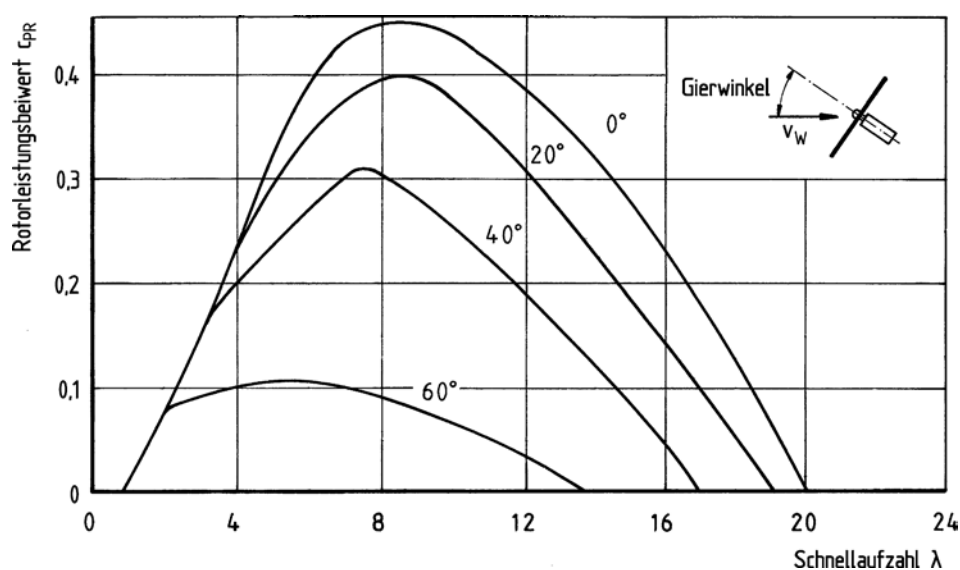


Abbildung 16 Verringerung des Rotorleistungsbeiwertes durch Schräganströmung

Quelle: [19], S. 122

2.4 Menschliches Leistungsvermögen

Dieser Abschnitt enthält ausgewählte wichtige Aspekte des Menschlichen Leistungsvermögens vor dem Hintergrund von Mensch-Maschine-Interaktionen, beispielsweise bei der Nutzung von Assistenzsystemen zur Führung von Fahrzeugen.

2.4.1 Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen

Das Modell nach Rasmussen beschreibt das menschliche Verhalten bei zielgerichteten Tätigkeiten [20]. Dabei werden drei kognitive Ebenen unterschieden, die unterschiedliche Wege ausgehend von sensorischen Informationen hin zu motorischen Aktionen beschreiben (s. Abbildung 17). Am kürzesten ist dieser Weg bei Handlungen, die auf der fertigkeitsbasierten Ebene ablaufen. Diese erfordern keine bewusste Steuerung der motorischen Aktionen, sondern basieren stattdessen auf dem System Mensch innewohnenden, hocheffizienten dynamischen Modellen zur Steuerung dieser Aktionen (statt Regelung) [21]. Einige dieser Modelle sind angeboren (Reflexe), andere werden erst durch intensives Training erworben [21]. Eine Ebene höher wird in einer Situation, die als bekannt erkannt wurde, eine dazu passende Regel angewandt, die sich in vergleichbaren Situationen bereits bewährt hat. Diese Regeln basieren auf Erfahrungen, wurden erlernt oder aus anderen Regeln abgeleitet [21]. In diesem Fall erfolgt die Koordination des fertigkeitsbasierten Verhaltens mit Hilfe der Regeln [21]. Auf der obersten Ebene werden unbekannte Situationen auf der Grundlage von vorhandenem Wissen und den verfolgten Zielen zunächst analysiert. Daraus ergeben sich eine oder mehrere Strategien, von denen die günstigste ausgewählt wird [21]. Auf dieser Ebene existiert ein mentales Modell des zu bedienenden technischen Systems, auf dessen Grundlage die einzelnen Schritte dieser Ebene durchgeführt werden [22]. Der Weg über die Ebene des wissensbasierten Verhaltens ist in Bezug auf die erforderliche Zeit vom Eingang der sensorischen Informationen bis zur Ausführung der motorischen Aktionen aufgrund der höheren kognitiven Beanspruchung der längste und in Abbildung 17 rot gekennzeichnet. Etwas schneller werden Situationen über die Ebene des regelbasierten Verhaltens (gelb gekennzeichnet) beurteilt. Der schnellste Weg verläuft über die Ebene des fertigkeitsbasierten Verhaltens (grün gekennzeichnet), da die hierfür erforderliche kognitive Leistung, die zum Herausfiltern von Merkmalen aus sensorischen Informationen benötigt wird, vergleichsweise sehr gering ist.

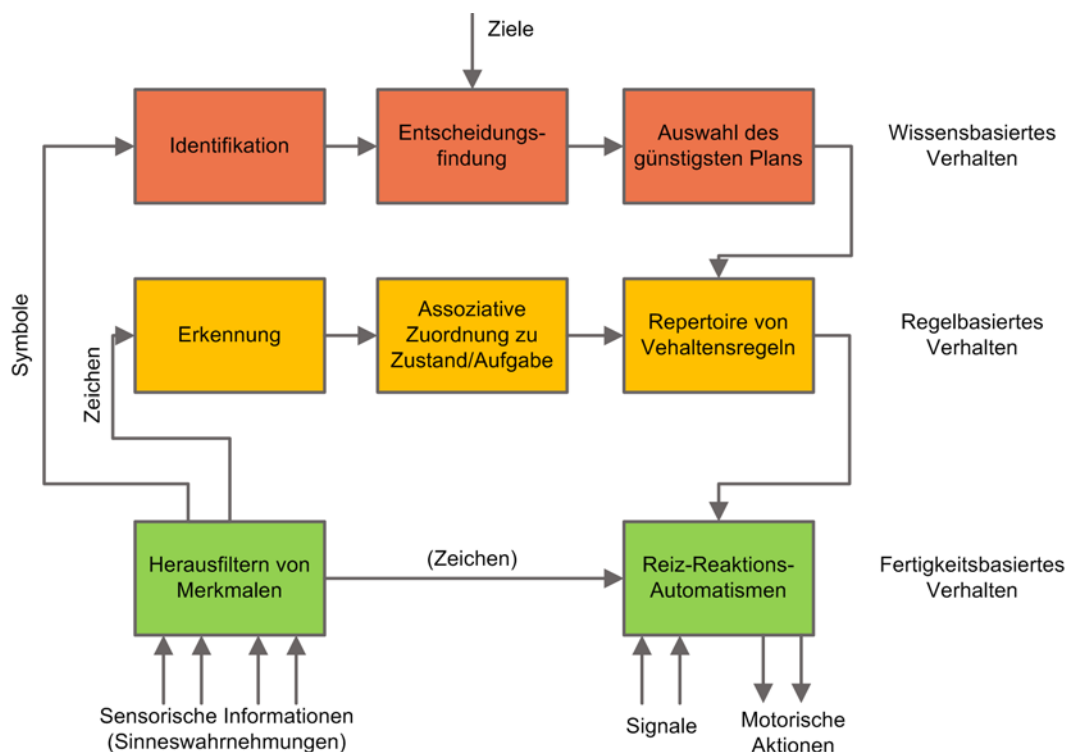


Abbildung 17 Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen

In Anlehnung an: [22], S. 258; [20], S. 15, [21], S. 12

Ein wenig trainierter Pilot (bzw. Fahrer) bewältigt Aufgaben mehr auf der Wissensebene und Regelebene als ein gut trainierter. Dieser Effekt wird besonders deutlich, wenn beispielsweise ein Flugschüler den Schwebeflug mit einem Hubschrauber erlernt. Je besser sein Übungsstand wird, desto leichter fällt es ihm, den Hubschrauber trotz Windeinflüssen und diversen Kopplungen, die ihn anfangs noch überfordern können, über einer Stelle zu halten. Wissensbasiertes Verhalten wird mehr und mehr zu regelbasiertem Verhalten und regelbasiertes Verhalten zu fertigkeitsbasiertem Verhalten.

2.4.2 Aufmerksamkeit-Wahrnehmung-Workload

Nach dem Aufmerksamkeit-Wahrnehmung-Workload-Modell können aufgrund der begrenzten Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses nicht alle sensorisch erfassten Informationen verarbeitet werden [21]. Der Prozess der Verarbeitung dieser Informationen wird als Wahrnehmung bezeichnet. Die Auswahl der zu verarbeitenden Informationen wird durch die Aufmerksamkeit gesteuert, welche selektiv, gerichtet oder geteilt sein kann [21]. Hiervon ist in Bezug auf schwierige Flugsituationen, zum Beispiel inmitten der Hinderniskulisse einer Stadt, besonders die geteilte Aufmerksamkeit von Interesse. Zwar können bis zu einem gewissen Grad die unterschiedlichsten Informationen parallel verarbeitet werden, jedoch besteht dabei stets die Gefahr der Überlastung [21]. Das bedeutet, dass ein Überforderungszustand eintritt, in dem nicht mehr alle parallel einströmenden Informationen verarbeitet werden können. Grund dafür ist, dass die

insgesamt zur Verfügung stehende Menge an Ressourcen (Aufmerksamkeitskapazität) begrenzt ist. Sollen mehrere Aufgaben gleichzeitig bewältigt werden, so wird die Aufmerksamkeit auf diese aufgeteilt. Ein wenig trainierter oder untrainierter Pilot bzw. Fahrer benötigt für normale Flug-/ Fahraufgaben einen größeren Anteil dieser Kapazität als ein gut trainierter. Tritt eine unvorhergesehene oder unbekannte Situation zusätzlich ein, kann es zur Überforderung kommen. Ein gut trainierter Pilot / Fahrer kann einen Großteil seiner Aufgaben über fertigungsbasiertes Verhalten ausführen und hat dadurch in Normalsituationen noch viel seiner mentalen Kapazität frei. Unvorhergesehene oder unbekannte Situationen führen bei ihm nicht so leicht zur Überforderung, wie bei einem wenig trainierten Piloten / Fahrer. Die mentale Belastung durch Flug- / Fahraufgaben ist bei einem Trainierten wesentlich geringer als bei einem Untrainierten. Der Begriff *Workload* steht in diesem Zusammenhang für die mentale Arbeitsbelastung (engl.: *mental workload*) und ist definiert als der Anteil der verfügbaren Kapazität, der zur Durchführung einer Aufgabe benötigt wird [23]. Wenn dieser Wert größer als eins wird, so ist die betroffene Person überlastet.

3 Offshore-Szenario

Als Hauptbestandteil dieser Arbeit geht es in diesem Kapitel um die Dynamik einzelner Komponenten eines bereits vorhandenen Offshore-Szenarios, dessen Bestandteile in Abschnitt 3.1 vorgestellt werden. Die Dynamik, die im Rahmen dieser Arbeit in dieses Szenario integriert wurde, konzentriert sich im Wesentlichen auf die Bewegungen der Wasseroberfläche (Abschnitt 3.2) und auf die Dynamik der sich darauf bewegenden Schiffe, welcher besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird (Abschnitt 3.3). Darüber hinaus werden auch die Bewegungen von Offshore-Windkraftanlagen betrachtet (Abschnitt 3.4).

3.1 Vorstellung des bisherigen Offshore-Szenarios

Das bisherige Offshore-Szenario enthält zwei verschiedene Offshore-Windparks mit 12 bzw. 80 Windkraftanlagen der 5-Megawatt-Klasse, welche im Abstand von rund 800 m zueinander stehen. Die realen Vorbilder dieser Parks liegen in der Nordsee. Es handelt sich um ‚Alpha Ventus‘ und ‚BARD Offshore 1‘. Neben den Windkraftanlagen enthalten sie auch Umspannplattformen und Forschungsplattformen, welche jeweils über ein Hubschrauberlandedeck verfügen. Die Windkraftanlagen in ‚Alpha Ventus‘ verfügen dagegen nur über Plattformen zum Windenversatz von Servicepersonal per Hubschrauber (s. Abbildung 18). Nicht Bestandteil der Windparks aber des Szenarios sind die Schiffsmodelle, die in Abschnitt 3.3 noch genauer vorgestellt werden. Sie wurden durch den Autor teilweise selbst erstellt (Supertanker ‚British Pioneer‘ und SCV ‚Island Enforcer‘) und teilweise um passende Texturen erweitert (Fregatte ‚F219‘).

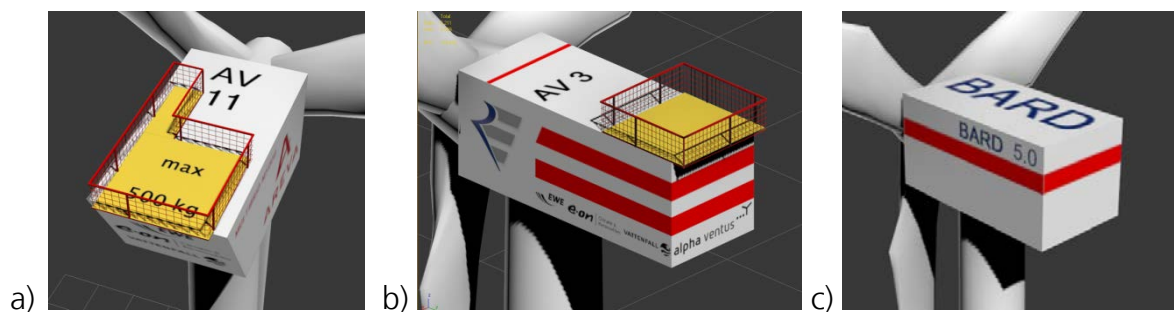


Abbildung 18 Generatorgondeln der WKA-Modelle

(a: AREVA Multibrid M5000, b: REPower 5M, c: BARD 5.0)

Bei ‚BARD-Offshore 1‘ wird das Personal per Hubschrauber zur Umspannplattform geflogen, von wo aus der Versatz zu den Windkraftanlagen per Schiff erfolgt [24]. Dabei kommt ein System (‚Ampelmann-System‘) zum Einsatz, das mit Hilfe einer auf dem Schiff befestigten Stewart-Plattform (Hexapod) und eines daran befestigten Teleskopauslegers einen gefahrlosen Übergang vom Schiff auf die Windkraftanlage auch bei Seegang ermöglicht (s. Abbildung 19) [24]. Die Windkraftanlagen in ‚BARD Offshore 1‘ verfügen daher über keine Windenversatzplattformen (s. Abbildung 18 c)).



Abbildung 19 Versatz mit dem Ampelmann-System

Quelle: [24], S. 27

3.2 *Dynamische Elemente: Wellen*

Für die Darstellung der Wellen im Szenario wurde die OpenSceneGraph (OSG)-Erweiterung `osgOcean` verwendet, welche speziell für die Darstellung von Wassereffekten, sowohl an der Oberfläche als auch unter Wasser, entwickelt wurde [25]. Durch die Verwendung von `osgOcean` für die Darstellung der bewegten Wasseroberfläche wird auch die Erzeugung einer durch die Wellen angeregten Schiffsbewegung ermöglicht.

Bei OpenSceneGraph handelt es sich um einen Satz quelloffener Hochleistungstools für die Darstellung von 3D-Grafik [26]. Es wurde in C++ und OpenGL geschrieben und kann auf allen gängigen Betriebssystemen verwendet werden [26]. OpenSceneGraph wird von Entwicklern aus vielen Bereichen, unter anderem auch aus der Sichtsimulation, verwendet und hat sich so weit etabliert, dass es inzwischen als die weltweit führende Szenengraph-Methode gilt [26]. So basiert auch die Sichtsimulation des DLR-Simulators AVES (Air Vehicle Simulator) auf OpenSceneGraph.

Für die Berechnung der Wellen wird in `osgOcean` standardmäßig das Phillips-Spektrum verwendet. Es handelt sich dabei um ein raumabhängiges, d.h. von der Wellenzahl k abhängiges Wellenspektrum, welches die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit als Eingangsparameter verwendet (vgl. [27]). Die Wasseroberfläche wird aus einzelnen Kacheln zusammengefügt, auf denen sich der gleiche Bewegungsablauf periodisch wiederholt. Das sich wiederholende Muster ist in Abbildung 20, welche vier Kacheln mit einer Kantenlänge von jeweils 256 m enthält, gut zu erkennen. Sie basiert auf Messungen eines Ausschnittes von 512 m · 512 m der simulierten Wasseroberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt. Zwischen den einzelnen Messpunkten lag in x- bzw. in y-Richtung jeweils ein Abstand von einem Meter. Mit Hilfe der in Abbildung 20 enthaltenen Farbskala kann für jeden Punkt der dargestellten Wasseroberfläche auch die ungefähre Wellenauslenkung in z-Richtung abgelesen werden.

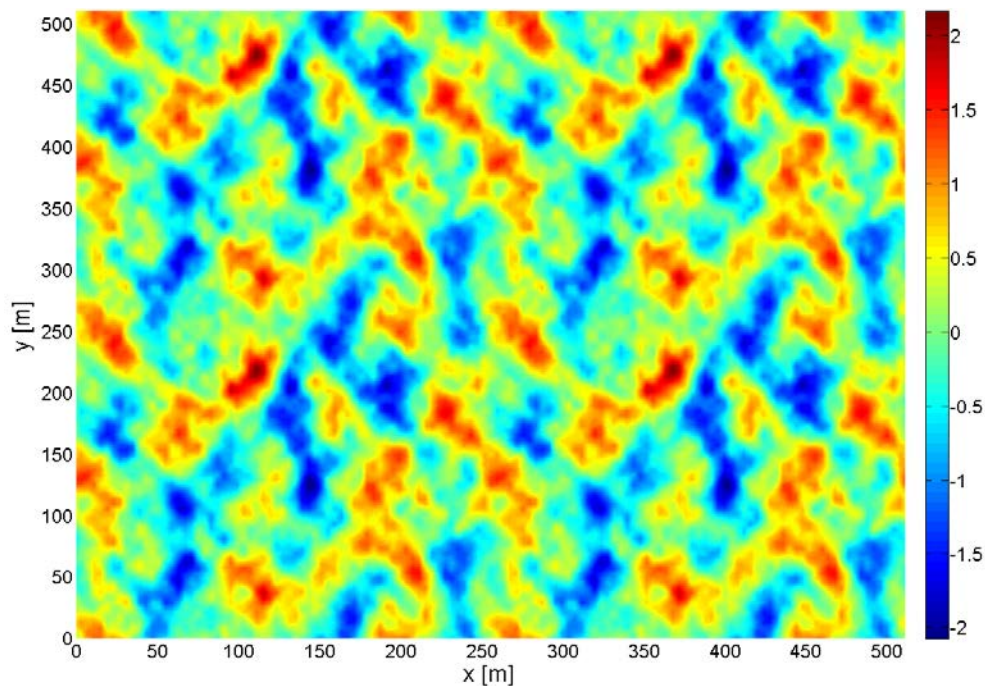


Abbildung 20 Momentaufnahme der simulierten Wasseroberfläche

Zusätzlich zu der periodischen Wiederholung des Bewegungsablaufs auf den einzelnen Kacheln gibt es noch einen weiteren wichtigen Unterschied zwischen dem simulierten und einem realen Seegang. In der Simulation werden für die Amplituden an jedem Punkt der Wasseroberfläche unterschiedliche Grenzwerte verwendet (s. Abbildung 21). Im Gegensatz dazu können in der Realität, statistisch gesehen, alle Amplituden des Seegangs an jedem Punkt einer begrenzten Wasseroberfläche auftreten. Die in Abbildung 21 dargestellten ortsfesten Zeitreihen der Wellenauslenkung wurden aus der Simulation aufgezeichnet. Die dazu verwendeten Messpunkte wurden zufällig ausgewählt. Die für diese Aufzeichnung eingestellte Windgeschwindigkeit betrug 12 m/s .

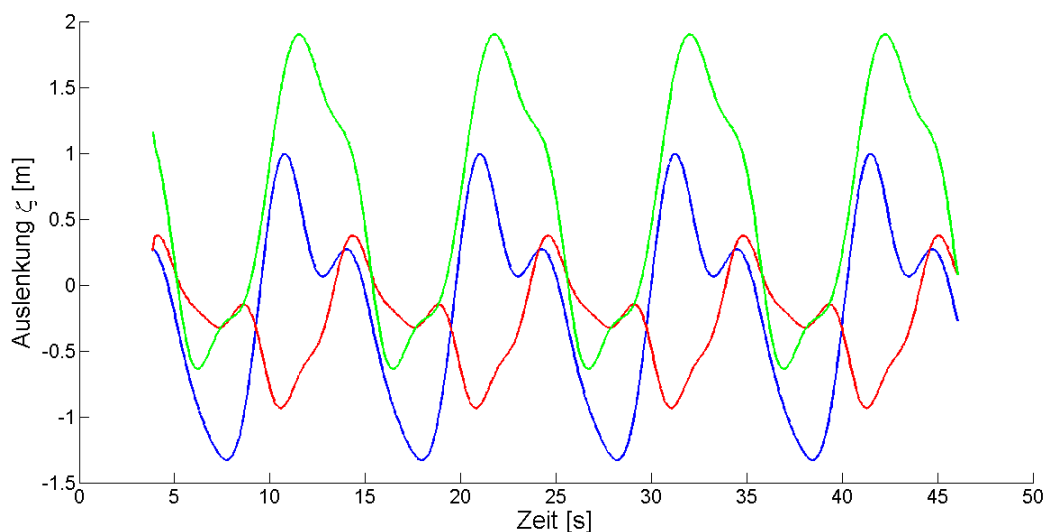


Abbildung 21 Zeitreihen für verschiedene Punkte der Wasseroberfläche

Stark vereinfacht ausgedrückt werden zur Erzeugung der bewegten Wasseroberfläche für jeden Bewegungsschritt zunächst die Fourier-Amplituden für die aktuelle Zeit berechnet und anschließend durch FFT (Fast Fourier Transformation) für jeden Punkt der Kachel in reale Höhenwerte transformiert (vgl. [27]). Die Größe und Anzahl dieser Kacheln sowie die Größe der darzustellenden bewegten Wasseroberfläche können über die Variablen ‚NumTiles‘ (Anzahl der Kacheln je Seite) und ‚resolution‘ (Seitenlänge einer Kachel) eingestellt werden. Mit der Variable ‚FFTGridSize‘ wird festgelegt, wie fein das für die Fast Fourier Transformation verwendete Netz sein soll. Beim voreingestellten Wert von 64 wird eine Kachel in 64x64 relevante Teilflächen unterteilt. Je höher der Wert für ‚FFTGridSize‘ gewählt wird, desto detaillierter wird die Wasseroberfläche simuliert [28]. Die Geschwindigkeit der Animation kann über die Variablen ‚NumFrames‘ und ‚AnimLoopTime‘ beeinflusst werden. Dabei steht ‚NumFrames‘ für die Anzahl an Einzelbildern (engl.: *frames*) pro Animationsdurchlauf und ‚AnimLoopTime‘ für die Zeit, die innerhalb eines Animationsdurchlaufs abgebildet wird. Eine Verdopplung der Variable ‚AnimLoopTime‘ bewirkt damit eine Verdopplung der Animationsgeschwindigkeit. Die Windlauflänge wird beim Phillips-Spektrum, im Gegensatz zum JONSWAP-Spektrum, nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass nur der lokal vorherrschende Wind die Wellenerzeugung in der Simulation beeinflusst. Der Entstehungsprozess des Seegangs aus Windsee und Dünung wird somit nicht mit berücksichtigt.

Um beide Spektren vergleichen zu können, wird zunächst das tatsächlich simulierte Spektrum benötigt. Dazu wurde eine ortsfeste Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung von knapp 80 Sekunden Dauer aus der Simulation aufgezeichnet. Die so gewonnenen Daten sind vergleichbar mit Messwerten einer am Meeresboden verankerten Boje, die der Auslenkung der Wasseroberfläche folgt. Aus der aufgezeichneten Zeitreihe wird anschließend mit Hilfe der Fourier-Analyse (FFT) das dazugehörige Spektrum bestimmt. Die gemessenen Werte sind jedoch nicht äquidistant, d.h. sie liegen in unterschiedlichen Zeitabständen vor. Da die FFT jedoch äquidistante Werte erwartet, werden die Messwerte vor der Fourier-Analyse noch interpoliert und damit äquidistant gemacht. Das für den Vergleich beider Spektren verwendete JONSWAP-Spektrum wird mit den Gleichungen (2.23) bis (2.28) berechnet. Mit einer Windlauflänge von 400 km für das JONSWAP-Spektrum ergibt sich für beide Spektren bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s ungefähr die gleiche Peakfrequenz (0,0984 Hz bei JONSWAP, 0,09826 Hz bei Phillips). Abbildung 22 zeigt den Verlauf beider Spektren über der Frequenz. Es ist deutlich zu erkennen, dass das aus der aufgezeichneten Zeitreihe bestimmte Spektrum mehrere Peaks aufweist, während das JONSWAP-Spektrum nur über einen Peak verfügt. Die Peaks des Zeitreihenspektrums liegen ungefähr in gleichem Abstand zueinander. Daher wird angenommen, dass es sich bei den beiden Peaks höherer Frequenz um höhere Harmonische der ersten Peakfrequenz handelt. Zwischen den Peaks ist der Verlauf des Zeitreihenspektrums sehr flach. Zusammenfassend betrachtet decken beide Spektren in etwa den gleichen Frequenzbereich ab. Jedoch konzentriert sich die Wellenenergie des aus der aufgezeichneten Zeitreihe bestimmten Spektrums fast ausschließlich auf die drei Peaks

während das JONSWAP-Spektrum auch in den energiearmen Bereichen des Zeitreihenspektrums signifikante Energieanteile aufweist.

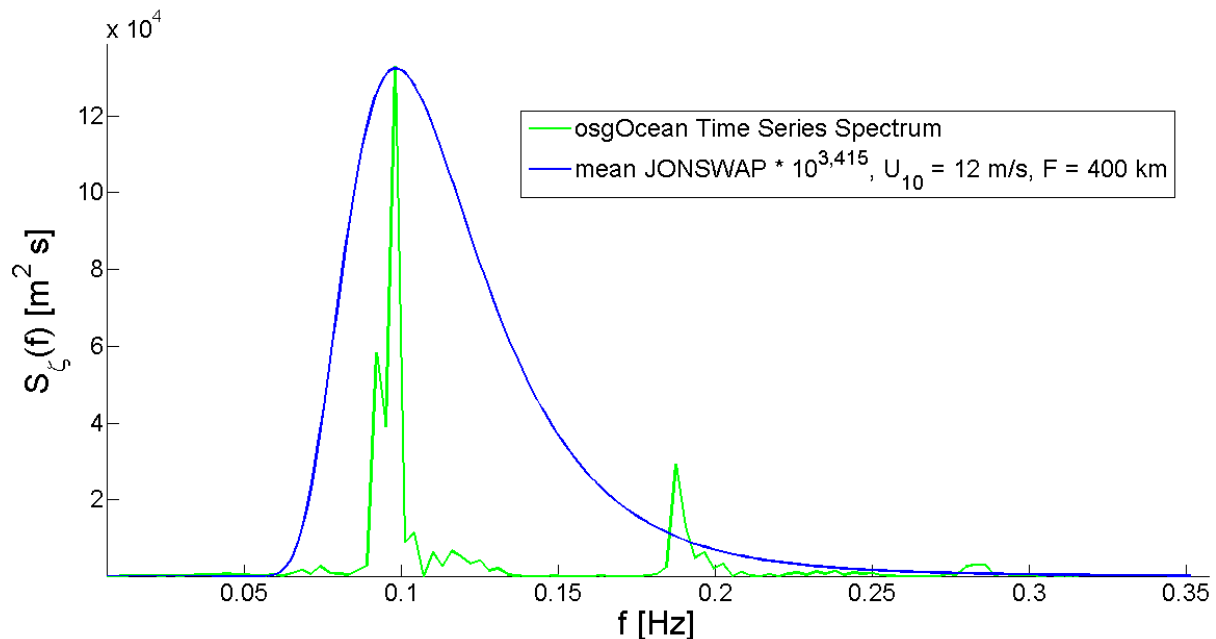


Abbildung 22 Vergleich des gemessenen Spektrums mit mean JONSWAP

3.3 Dynamische Elemente: Schiffe

Zur Verwendung im Offshore-Szenario stehen derzeit drei verschiedene Schiffsmodelle zur Verfügung. Es handelt sich dabei um einen Öltanker (VLCC: *Very Large Crude Carrier*), ein Bauschiff für Unterwasserkonstruktionen (SCV: *Subsea Construction Vessel*) und eine Fregatte der Deutschen Marine. Alle drei Schiffe verfügen über eine Landemöglichkeit für Hubschrauber. Abbildung 23 zeigt die 3D-Modelle der bisher für das Szenario verfügbaren Schiffe. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Dimensionen und Kennzahlen dieser drei Schiffe enthalten.



Abbildung 23 3D-Modelle der verfügbaren Schiffe

	Länge [m]	Breite [m]	Tiefgang [m]	Verdrängung [t]	Maximale Geschwindigkeit [kt]
Tanker ,British Pioneer'	334,00	58,00	22,15	348817	15
SCV ,Island Enforcer'	122,40	23,00	6,00	7500	10
Fregatte ,F 219 Sachsen'	143,00	17,44	6,00	5800	29
,Vessel Type 1'	103,00	15,95	6,66	8800	unbekannt

Tabelle 2 Dimensionen und Kennzahlen der verfügbaren Schiffe

Quellen: [29], [30], [31]

3.3.1 Verwendetes Modell

Für die Implementierung der Schiffsdynamik wurde zunächst das Modell des Tankers ‚British Pioneer‘ ausgewählt (s. Abbildung 23a und Tabelle 2), da angenommen wurde, dass die für die Bewegungsgleichungen benötigten hydromechanischen Koeffizienten für dieses Schiff über eine Skalierung bekannter Koeffizienten eines anderen Tankers ermittelt werden können. Bei dem anderen Tanker handelt es sich um ‚Vessel Type 1‘ (vgl. Tabelle 2) aus der Demo-Version der Software OrcaFlex [32], dessen Koeffizienten mit der Software NMIWave ermittelt wurden [33]. NMIWave wurde auch genutzt, um die Berechnungen von OrcaFlex zu validieren [34]. Trotz der geringeren Größe des ‚Vessel Type 1‘ wurde aufgrund der ähnlichen, für Tanker charakteristischen Proportionen angenommen, dass sich die beiden Schiffe auch hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens ähneln. Die hydromechanischen Koeffizienten des ‚Vessel Type 1‘ wurden daher, obwohl der Tanker ‚British Pioneer‘ mit diesem nicht in alle Richtungen gleich skaliert, für das Modell angepasst. Die dabei angewandten Skalierungsregeln [33] sind in Tabelle 3 aufgeführt. Sie basieren auf dem Verhältnis der Schiffslänge des ausgewählten Schiffsmodells zur Länge des ‚Vessel Type 1‘. Diese Methode setzt geometrische Ähnlichkeit voraus und wurde von William Froude entdeckt [35]. Sie wird daher auch als Froude-Skalierung bezeichnet [33].

Für die hydrodynamische Dämpfung und die hydrodynamische Masse, welche beide von der Anregungsfrequenz der Schwingung abhängen, wurden die Werte für eine Periodendauer von zehn Sekunden verwendet. Dieser Wert für die Periodendauer wurde aufgrund des Wertes der ersten Peakfrequenz des Zeitreihenspektrums von ca. 0,1 Hz gewählt, da die Wellen in der Umgebung dieser Frequenz die höchsten Energieanteile enthalten. Die hydrostatische Steifigkeit ist dagegen frequenzunabhängig, da sie nur mit der zeitunabhängigen Auslenkung multipliziert werden muss, um die Rückstellkraft bzw. das Rückstellmoment der betrachteten Bewegungskomponente zu erhalten. Tabelle 3 enthält die allgemeinen Skalierungsfaktoren für Längen, Massen und Zeiten sowie die darauf basierenden Skalierungsfaktoren der hydromechanischen Koeffizienten. Die in Tabelle 3 angegebenen Zahlenwerte beziehen sich dabei ausschließlich auf eine Umrechnung

von Werten des ‚Vessel Type 1‘ in Werte für das verwendete Modell des Tankers ‚British Pioneer‘.

	Skalierungsfaktor
Längen [m]	$R = L_{\text{British Pioneer}} / L_{\text{Vessel Type 1}} = 334 \text{ m} / 103 \text{ m} = 3,2427\dots$
Massen [kg]	$R^3 = 34,0979\dots$
Zeiten [s]	$R^{0,5} = 1,8007\dots$
Hydrodyn. Masse a [kg]	$R^3 = 34,0979\dots$
Hydrodyn. Dämpfung b [kg/s]	$R^3/R^{0,5} = R^{2,5} = 18,9353\dots$
Hydrostat. Steifigkeit c [kg/s²]	$R^3/(R^{0,5} * R^{0,5}) = R^2 = 10,5152\dots$

Tabelle 3 Allgemeine Skalierungsfaktoren und Skalierung der Koeffizienten

Quelle: [33]

Wie sich herausstellte, ist diese Methode jedoch nicht auf das für die Sichtsimation stark vereinfachte Dynamikmodell anwendbar. Dies ist auf folgende Gründe zurückzuführen:

- Im Unterschied zur Software ‚OrcaFlex‘ werden im vereinfachten Dynamikmodell für die Sichtsimation nur drei der sechs Freiheitsgrade berücksichtigt und Kopplungen vernachlässigt.
- Die ungleiche Skalierung in den verschiedenen Richtungen hat einen größeren Einfluss als zunächst angenommen.

Es musste daher eine andere Methode gefunden werden, mit der sich die hydro-mechanischen Koeffizienten ohne eine teure zusätzliche Software näherungsweise bestimmen lassen. Die gefundene Methode wird in Abschnitt 3.3.3.2 vorgestellt.

3.3.2 Dynamik der Schiffsbewegung

Für die Dynamik der Schiffsbewegung werden zunächst einige Vereinfachungen festgelegt und allgemeine sowie vereinfachende Annahmen getroffen.

- Es werden nur drei der sechs Freiheitsgrade berücksichtigt (heave, roll und pitch)
- Kopplungen der Bewegungskomponenten werden nicht berücksichtigt
- Das Schiff wird als starrer Körper betrachtet, der sich nicht verformt
- Der Schiffsrumpf wird als Quader betrachtet
- Die Schiffsmasse wird als horizontal gleichmäßig verteilt angenommen
- Wasserpartikel können den Schiffsrumpf nicht durchdringen
- Die Wasserdichte wird als konstant betrachtet
- Wasser wird als inkompressibles Medium betrachtet
- Bis auf den Seegang werden keine äußeren Einflüsse (z.B. Wind) berücksichtigt

Die Beschränkung der Schiffsbewegung auf drei Freiheitsgrade erfolgt vor dem Hintergrund der Tatsache, dass nur bei diesen Bewegungskomponenten rückstellende Kräfte und Momente auftreten [11]. Das bedeutet, dass die hydrostatischen Federsteifigkeiten $c_{i,j}$ mit Beteiligung der anderen Freiheitsgrade ($i, j = [1,2,6]$) Null sind. Die Existenz rückstellender Kräfte und Momente führt bei den betrachteten Bewegungskomponenten zu vergleichsweise großen Amplituden, was sie zu den wichtigsten Komponenten in Bezug auf das Seeverhalten des Schiffes macht [36].

Mit den oben getroffenen Annahmen und Vereinfachungen ergeben sich mit den Gleichungen (3.9) bis (3.11) drei voneinander unabhängige Bewegungsdifferentialgleichungen für die Translation in z-Richtung sowie die Rotationen um die x- und die y-Achse, welche sowohl die hydromechanischen als auch die welleninduzierten Kräfte bzw. Momente enthalten. Die Entstehung dieser Gleichungen wird nachfolgend am Beispiel der Tauchbewegung näher erläutert.

Der wichtigste Anteil der welleninduzierten Kraft in z-Richtung F_w ist die sogenannte Froude-Krylov Kraft [37]. Sie folgt aus der Integration des Druckes über der Wasserlinienfläche A_{WL} des eingetauchten Körpers, welche im Fall eines Quaders der Fläche dessen horizontaler Unterseite entspricht [11]. Für diesen Teil der welleninduzierten Kraft wird angenommen, dass die Welle nicht durch das Schiff verformt wird [11]. Die Froude-Krylov Kraft F_{FK} kann mit Gleichung (3.1) berechnet werden. Darin stehen der Koeffizient c für die hydrostatische Steifigkeit und ζ^* für die reduzierte bzw. effektive Wasserspiegelauslenkung in z-Richtung. Letztere lässt sich mit Gleichung (3.2) bestimmen und mit Hilfe der linearisierten Bernoulli-Gleichung aus der klassischen Wellentheorie für Tiefwasserwellen herleiten [11]. In Gleichung (3.2), welche sich auf eine harmonische Welle bezieht, sind k die Wellenzahl und T der Tiefgang des Schiffes.

$$F_{FK} = c \cdot \zeta^* \quad \text{mit} \quad c = \rho g A \quad (3.1)$$

$$\zeta^* = e^{-kT} \cdot \zeta_a \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

Durch die Verwendung der effektiven Wellenauslenkung wird der Effekt berücksichtigt, dass die Wellenenergie mit zunehmender Wassertiefe abnimmt. Die Energie verhält sich dabei proportional zum Quadrat der effektiven Auslenkung (vgl. Gleichung (2.14)) und damit auch zum Quadrat der vertikal wirkenden Kraft F_{FK} (vgl. Gleichung (3.1)). Die Herleitung der effektiven Wellenauslenkung basiert auf der Annahme, dass die horizontalen Abmessungen der ebenen Unterseite des betrachteten Körpers gegenüber der Wellenlänge klein sind, woraus sich eine konstante Druckverteilung auf der gesamten Unterseite ableiten lässt [11]. Die zugrundeliegende Annahme trifft jedoch für das verwendete Schiff bei einer Wellenlänge im Bereich der Peakfrequenz nicht zu. Unter Zuhilfenahme der Gleichung der Phasengeschwindigkeit für die Tiefwasser-Dispersions-

relation (Gleichung (2.10)) ergibt sich für die Wellenlänge bei einer Frequenz von $f = f_p \approx 0,1 \text{ Hz}$ nach Gleichung (3.3) ein Wert von $\lambda \approx 156 \text{ m}$.

$$\lambda = \frac{g}{2\pi f^2} \quad (3.3)$$

Damit Gleichung (3.2) trotzdem verwendet werden darf, ist es erforderlich, die Wellenauslenkung an mehreren, über die gesamte Schiffslänge verteilten Punkten zu messen. Mit dem Mittelwert aus diesen Messungen anstelle der auf einem einzigen Messpunkt basierenden Wellenauslenkung und der vereinfachenden Annahme, dass es sich beim verwendeten Schiff um einen Quader mit ebener Unterseite handelt, ist die Verwendung von Gleichung (3.2) auch für ein Schiff mit $L > \lambda$ zulässig. Der Abstand zw_{dist} zwischen den Messpunkten sollte jedoch wesentlich kleiner sein als die Wellenlänge, so dass Gleichung (3.4) erfüllt ist [11].

$$k \cdot zw_{dist} \approx 0 \quad (3.4)$$

Aus der Inkompressibilität des Wassers folgt eine lineare Zunahme des Druckes mit zunehmender Wassertiefe. Bei einer Relativbewegung zwischen Schiff und Wasser, als Reaktion des Schiffes auf eine Auslenkung oder durch eine Auslenkung der Wasseroberfläche gegenüber dem Schiff aufgrund einer Welle, ist die resultierende Froude-Krylov Kraft in Verbindung mit der als konstant angenommenen Wasserdichte proportional zur relativen Auslenkung (vgl. Gleichungen (3.1) und (3.8)). Um die gesamte Wellenkraft zu erhalten, muss die Froude-Krylov Kraft noch um die Anteile korrigiert werden, die durch eine teilweise Verformung der Wellen durch das sich im Wasser befindende Schiff entstehen [11]. Die gesamte Wellenkraft F_w kann mit Gleichung (3.5) berechnet werden.

$$F_w = a\ddot{\zeta}^* + b\dot{\zeta}^* + c\zeta^* \quad (3.5)$$

Nach dem Superpositionsprinzip aus Kapitel 2.2.4 gilt Gleichung (3.6), nach welcher die Bewegung der festen Masse als Summe aus hydromechanischen und welleninduzierten Kräften bzw. Momenten verstanden wird.

$$m\ddot{z} = F_h + F_w \quad (3.6)$$

Tauchen (Index 3):

In Gleichung (3.7) stehen nun der Term der festen Masse und die hydromechanische Kraft in z-Richtung zusammengefasst auf der linken Seite und auf der rechten Seite die welleninduzierte Kraft. Umgestellt nach $m\ddot{z}$ wird deutlich, dass es sich um eine Relativbewegung zwischen Wasserpartikeln und dem Schiff als Festkörper handelt (Gleichung (3.8)). Mit Gleichung (3.9) folgt schließlich die Form der Bewegungsgleichung, wie sie für die spätere Implementierung in osgOcean benötigt wird.

$$(m + a_{33})\ddot{z} + b_{33}\dot{z} + c_{33}z = a_{33}\ddot{\zeta}^* + b_{33}\dot{\zeta}^* + c_{33}\zeta^* \quad (3.7)$$

$$m\ddot{z} = a_{33}(\ddot{\zeta}^* - \ddot{z}) + b_{33}(\dot{\zeta}^* - \dot{z}) + c_{33}(\zeta^* - z) \quad (3.8)$$

$$\ddot{z} = \frac{a_{33}\ddot{\zeta}^* + b_{33}(\dot{\zeta}^* - \dot{z}) + c_{33}(\zeta^* - z)}{m + a_{33}} \quad (3.9)$$

Analog zur Tauchbewegung ergeben sich für die betrachteten Rotationen die Gleichungen (3.10) und (3.11). Darin stehen ϕ_w und θ_w für die Wellenneigungswinkel in Quer- und in Längsrichtung, auf deren Ermittlung in Abschnitt 3.3.3.4 noch eingegangen wird. I_{xx} und I_{yy} sind die Massenträgheitsmomente um die x- und um die y-Achse und m ist die Verdrängungsmasse des Schiffes ($m = \rho\Delta$).

Rollen (Index 4):

$$\ddot{\phi} = \frac{a_{44}\ddot{\phi}_w + b_{44}(\dot{\phi}_w - \dot{\phi}) + c_{44}(\phi_w - \phi)}{I_{xx} + a_{44}} \quad (3.10)$$

Stampfen (Index 5):

$$\ddot{\theta} = \frac{a_{55}\ddot{\theta}_w + b_{55}(\dot{\theta}_w - \dot{\theta}) + c_{55}(\theta_w - \theta)}{I_{yy} + a_{55}} \quad (3.11)$$

Als Wellenneigungswinkel in Längs- und Querrichtung sind für die Rotationen des Schiffes jeweils die mittleren Wellenneigungswinkel für die gesamte Wasserlinienfläche A_{WL} relevant. Durch diese Anregung wirken Drehmomente um die Längs- und die Querachse auf das Schiff, welche über den Federterm in die Bewegungsgleichungen einfließen. Der Effekt, den diese Anregung auf das Schiff hat, ist vergleichbar mit einer Anregung durch eine ruhende Wasseroberfläche, die komplett in Längs- oder Querrichtung gegenüber dem Schiff geneigt wird. Dauert eine solche Auslenkung nur kurz an, wirkt sie wie ein Impuls und regt das Schiff zu einer Schwingung um seine Ruhelage an. Dauert die Auslenkung länger an (einige Sekunden oder Minuten), dann ergibt sich daraus für das Schiff eine neue Ruhelage. Zum Beispiel würde das Schiff bei einem konstanten Längsneigungswinkel der ruhenden Wasseroberfläche auch diese Lage einnehmen. Die Schiffsreaktion auf einen Impuls durch Neigung der ruhenden Wasseroberfläche wäre bei kleinen Auslenkungen näherungsweise die gleiche, wie auf eine Winkelauslenkung des Schiffes gegenüber der nicht geneigten ruhenden Wasseroberfläche. Dieser Zusammenhang gilt sinngemäß auch für die Tauchbewegung. Da der Aufwand für die Ermittlung der tatsächlichen mittleren Wellenneigungswinkel für die gesamte Wasserlinienfläche A_{WL} für eine Echtzeitsimulation um ein Vielfaches zu hoch wäre, wird eine stark vereinfachte Methode zur Ermittlung dieser Winkel verwendet. Diese wird in Abschnitt 3.3.3.4 anhand eines Beispiels vorgestellt.

In Abbildung 24 sind die drei Bewegungsgleichungen (Gleichungen (3.9) bis (3.11)) in einem exemplarischen Blockdiagramm dargestellt, auf dessen Grundlage auch die spätere Implementierung erfolgt. Für die Rotationen steht im Diagramm anstelle der Schiffsmasse m eines der beiden Massenträgheitsmomente (I_{xx} oder I_{yy}). Das Blockdiagramm wurde in MATLAB/Simulink erstellt und ist als Simulink-Modell ausführbar. Für die in diesem Simulink-Modell verwendeten Variablen wurde eine Matlab-Skriptdatei erstellt. Der Verlauf der einzelnen Größen über die Dauer der Simulation kann über einen ‚Scope‘-Block, der im abgebildeten Modell nicht enthalten ist, betrachtet werden. Für jeden Zeitschritt wird die Summe aus dem Trägheitsterm $a \cdot acc_wave$, dem Dämpfungsterm $b \cdot (vel_wave - velocity)$ und dem Federterm $c \cdot (Wave_elevation - displacement)$ gebildet und anschließend durch die Summe der Massen ($a + m$) geteilt. Die aus dieser Berechnung erhaltene Beschleunigung des Schiffes wird zweimal nach der Zeit integriert, was die Auslenkung des Schiffes für den nächsten Iterationsschritt liefert.

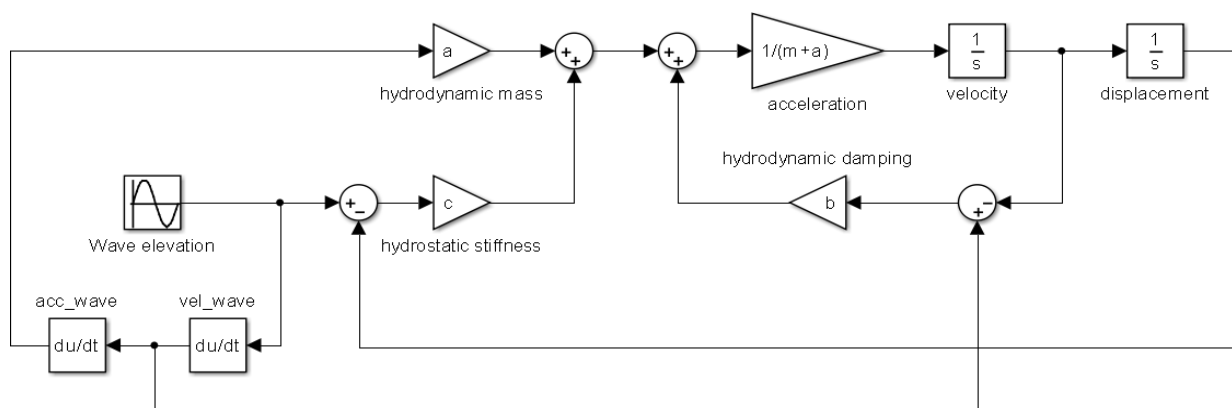


Abbildung 24 Blockdiagramm für die Bewegungsgleichungen

3.3.3 Implementierung der Schiffsdynamik in die Simulation

Die Implementierung der Schiffsdynamik in die Simulation basiert auf einem für osgOcean verfügbaren Beispiel, in dem sich ein kleines Schlauchboot in Abhängigkeit von den Wellen auf der Wasseroberfläche bewegt. Diese Bewegung setzt sich aus einer Translation in z-Richtung sowie den Rotationen um alle drei Achsen zusammen. Als Grundlage dafür dienen die Höhe des Wasserspiegels am Koordinatenursprung des Schiffsmodells, welcher die Position und gleichzeitig die Schwerpunktlage des Schiffes kennzeichnet, sowie der Normalenvektor auf der Wasseroberfläche an diesem Punkt. Beide Größen werden durch Aufruf der Funktion ‚getOceanSurfaceHeightAt‘ bestimmt. Anschließend erfolgt eine Translation auf die so ermittelte Höhe (Variable ‚height‘). Für die Rotationen des Schlauchboots werden die Werte der Komponenten des Normalenvektors als Bogenmaßwerte der Rotationswinkel verwendet. Abbildung 25 zeigt den entsprechenden Quellcodeabschnitt der osgOcean-Datei ‚application.cpp‘.

```
float height = _oceanscene->getOceanSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y(), &normal);

mat.maketranslate(osg::vec3f(pos.x(), pos.y(), height));

osg::matrix rot;
rot.makeidentity();
rot.makerotate( normal.x(), osg::vec3f(1.0f, 0.0f, 0.0f),
               normal.y(), osg::vec3f(0.0f, 1.0f, 0.0f),
               (1.0f-normal.z()), osg::vec3f(0.0f, 0.0f, 1.0f));

mat = rot*mat;
```

Abbildung 25 Schiffsbewegungen im osgOcean-Beispiel

Quelle: [38]

Die Bewegung des Schlauchbootes im Beispiel basiert auf der Annahme, dass das Boot exakt der Wellenbewegung folgt und über keine Eigendynamik verfügt. Da es sich beim verwendeten Schlauchboot um ein sehr leichtes und im Vergleich zur Wellenlänge sehr kleines Boot handelt, ist diese Annahme für das Beispiel auch zulässig. Für größere Schiffe, wie sie in der Sichtsimation verwendet werden sollen, ergäben sich mit dieser Annahme jedoch große Fehler bzw. Ungenauigkeiten. Für die Schiffsdynamik in der Sichtsimation muss das osgOcean-Beispiel daher entsprechend modifiziert und erweitert werden.

3.3.3.1 Modifizierung der Klasse ‚BoatPositionCallback‘

Die Änderungen wurden innerhalb der Klasse ‚BoatPositionCallback‘ des Beispiels vorgenommen, welche während der Simulation für jeden Zeitschritt einmal aufgerufen wird. Innerhalb der Klasse werden zunächst einige Parameter eingelesen, die das jeweilige Schiff charakterisieren. Es handelt sich dabei um die Länge, die Länge zwischen den Loten, die Breite, die Verdrängungsmasse, den Tiefgang, die auf eins normierten Faktoren für die Trägheitsradien um die x- und y-Achse (k_{xx} und k_{yy}), sowie die vertikale Lage des Schwerpunkts. Mit diesen Parametern erfolgt anschließend der Aufruf der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ zur Berechnung der hydromechanischen Koeffizienten des Schiffes (s. Abbildung 26). Außerdem enthält der Funktionsaufruf auch die Variablen, die durch die Funktion mit den berechneten Koeffizienten überschrieben werden sollen. Da für die gesamte Simulationsdauer die gleichen Koeffizienten verwendet werden und ihre Berechnung daher nur einmal erforderlich ist, erfolgt der Aufruf der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ nur beim ersten Aufruf der Klasse ‚BoatPositionCallback‘ (vgl. Abbildung 26).

```
if (n == 0){
    Calculate_coefficients(m_length, m_Lpp, m_breadth,
                          m_mass, m_draught, m_CGz,
                          m_rgx, m_rgy,
                          a33, b33, c33,
                          a44, b44, c44,
                          a55, b55, c55);
}
```

Abbildung 26 Aufruf der Funktion ‚Calculate_coefficients‘

Anschließend wird die Zeitdifferenz zum vorherigen Schritt (,t_step') ermittelt (s. Abbildung 27). Da dieser Wert aufgrund numerischer Differentiationen im weiteren Programmablauf nicht Null betragen darf, wurde für den ersten Schritt an dieser Stelle eine künstliche Verzögerung eingebaut (,Sleep(1000)' in Abbildung 27). Dies ist auch die Ursache dafür, dass die Auslenkungen der Schiffsbewegung in den ersten paar Sekunden der Simulation nicht stimmen.

```
//Frequenz des Performance Counters
if (!QueryPerformanceFrequency((LARGE_INTEGER*)&f_perf))
    cout<<"Performance Counter nicht vorhanden"<<endl;

//Aktuelle Zeit
QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER*)&t_now);

//Startwert fuer 't_last' setzen
if (n == 0){
    QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER*)&t_now);
    Sleep(1000);
    QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER*)&t_last);
}

//Zeitschritt fuer Iteration
t_step = (((double)(t_now - t_last))/((double)f_perf));
```

Abbildung 27 Bestimmung der Zeitdifferenz für den Iterationsschritt

In Anlehnung an: [39]

Mit Hilfe der Funktion ,getSurfaceHeightAt' werden anschließend die Auslenkungen der Wasseroberfläche an allen Messpunkten bestimmt. Die für die Tauchbewegung ermittelte mittlere Auslenkung ,medium_height' wird durch Multiplikation mit dem Faktor e^{-kT} auf den Wert der effektiven Wellenhöhe reduziert (vgl. Gleichung (3.2)). Das Ergebnis dieser Berechnung steht für die weiteren Berechnungen als welleninduzierte Anregung der Tauchbewegung (,zw_eff_now') zur Verfügung. Für die Berechnung der Wellenzahl k , welche zur Berechnung des Faktors für die effektive Wellenauslenkung benötigt wird, wurde die Frequenz $f = f_p \approx 0,1 \text{ Hz}$ verwendet. Dies ist die Peakfrequenz des aus der Simulation ermittelten Zeitreihenspektrums, bei welcher die Wellen den größten Energieanteil enthalten. Gleichung (3.12) zur Berechnung der Wellenzahl k basiert auf der Gleichung der Phasengeschwindigkeit für die Tiefwasser-Dispersionsrelation (Gleichung (2.10)).

$$k = \frac{4\pi^2 f^2}{g} \quad (3.12)$$

Anschließend wird die Funktion zur Berechnung der Bewegungskomponenten (,Calculate_motion') mit den Variablen für die Tauchbewegung aufgerufen. Es folgen die Berechnungen der Wellenneigungswinkel in Längs- und Querrichtung und die Funktionsaufrufe von ,Calculate_motion' für die Rollbewegung und die Stampfbewegung. Danach werden die Translation in z-Richtung und die beiden Rotationen ausgeführt.

Schließlich werden am Ende jeder Iteration noch die Vorgängerwerte der Auslenkungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller drei Bewegungskomponenten, jeweils für die Wellen und für das Schiff, sowie der Vorgängerwert der Zeit für die nächste Iteration gesetzt. Abbildung 28 zeigt eine Übersicht über den beschriebenen Ablauf einer Iteration der Klasse ‚BoatPositionCallback‘.

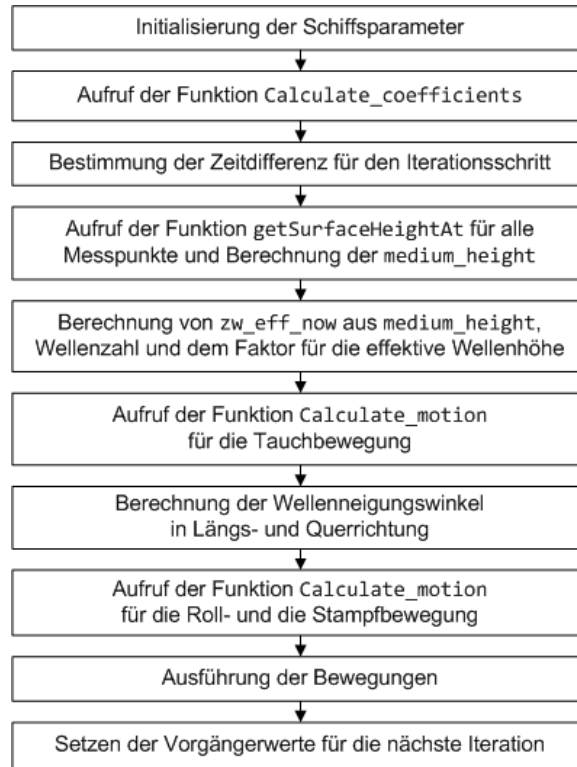


Abbildung 28 Flussdiagramm der Klasse ‚BoatPositionCallback‘

3.3.3.2 Funktion zur Berechnung der Koeffizienten

Die Funktion ‚Calculate_coefficients‘ dient zur Berechnung der hydromechanischen Koeffizienten auf der Basis der Schiffsparameter, die zu Beginn der Klasse ‚BoatPositionCallback‘ initialisiert werden. Sie werden beim Aufruf der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ an diese übergeben (vgl. Abbildung 26). Innerhalb der Funktion werden für alle drei Bewegungskomponenten zunächst mit den Gleichungen (3.13) bis (3.15) die entsprechenden Federkoeffizienten berechnet [11]. Diese hängen bei konstanter Wasserdichte und Erdbeschleunigung nur von der Geometrie des Schiffes und dessen vertikaler Schwerpunktlage ab.

$$c_{33} = \rho g \cdot A_{WL} \quad (3.13)$$

$$c_{44} = \rho g \nabla \cdot \overline{GM} \quad (3.14)$$

$$c_{55} = \rho g \nabla \cdot \overline{GM}_L \quad (3.15)$$

Darin sind A_{WL} die Wasserlinienfläche und \overline{GM} und \overline{GM}_L die metazentrischen Höhen in Quer- und Längsrichtung. Die Wasserlinienfläche A_{WL} ist die Schnittfläche des Schiffes auf der Höhe der Wasserlinie (s. Abbildung 29). Es wird hierfür vom vollbeladenen Zustand des Schiffes im Sommer ausgegangen, so dass als dazugehörige Wasserlinienlänge die Länge zwischen den Loten L_{pp} (engl.: *length between perpendiculars*) verwendet werden kann [40]. Diese ist für das verwendete Schiff ‚British Pioneer‘ bekannt und beträgt $L_{pp} = 320 \text{ m}$ (vgl. [29]). Alternativ dazu kann die Länge zwischen den Loten auch über das 3D-Modell für einen beliebigen Tiefgang bestimmt werden. Die näherungsweise Berechnung der Wasserlinienfläche für das verwendete Schiff mit Gleichung (3.16) ergibt $A_{WL} \approx 16181 \text{ m}^2$. In Abbildung 29 sind die in Gleichung (3.16) verwendeten Abmessungen dargestellt. Der Term in der Klammer von Gleichung (3.16) ist eine Näherung für den Völligkeitsgrad der Wasserlinienfläche (engl.: *waterplane area coefficient*) $C_W = A_{WL}/(B \cdot L_{pp})$.

$$A_{WL} = B \cdot L_{pp} \left(1 - \sqrt{0,5} \cdot \frac{B}{L_{pp}} \right) \quad (3.16)$$

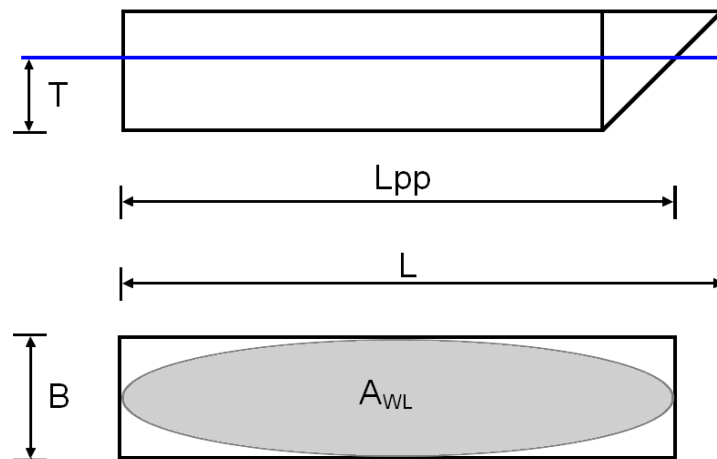


Abbildung 29 Länge zwischen den Loten L_{pp} und Wasserlinienfläche A_{WL}

Die Berechnung der metazentrischen Höhen soll am Beispiel der transversalen metazentrischen Höhe \overline{GM} erläutert werden, die für die Berechnung des Federkoeffizienten der Rollbewegung benötigt wird (vgl. Gleichung (3.14)). Die Bezeichnung \overline{GM} steht für den Abstand zwischen dem Schwerpunkt (hier: G) und dem Metazentrum M (s. Abbildung 30). In Abbildung 30 a) ist die Situation ohne Auslenkung gezeigt, in der alle vier eingezeichneten Punkte senkrecht übereinander liegen. Der Punkt K kennzeichnet den Kiel des Schiffes (engl.: *keel*) und der Punkt B das Zentrum des hydrostatischen Auftriebs (engl.: *centre of buoyancy*). Wird das Schiff bei ruhender Wasseroberfläche um den Rollwinkel ϕ ausgelenkt, verändert sich die Lage des Auftriebszentrums B , welches von der Mittellinie des Schiffes abweicht, dabei aber senkrecht unter dem Metazentrum bleibt (s. Abbildung 30 b). Dies hat zur Folge, dass ein rückstellendes bzw. aufrichtendes Moment um den

Schwerpunkt G mit dem Hebelarm \overline{GZ} entsteht (s. Abbildung 30 c)). Je größer die metazentrische Höhe \overline{GM} ist, desto größer ist der Hebelarm \overline{GZ} und desto größer ist auch das rückstellende Moment als Reaktion auf eine Auslenkung aus der Gleichgewichtslage.

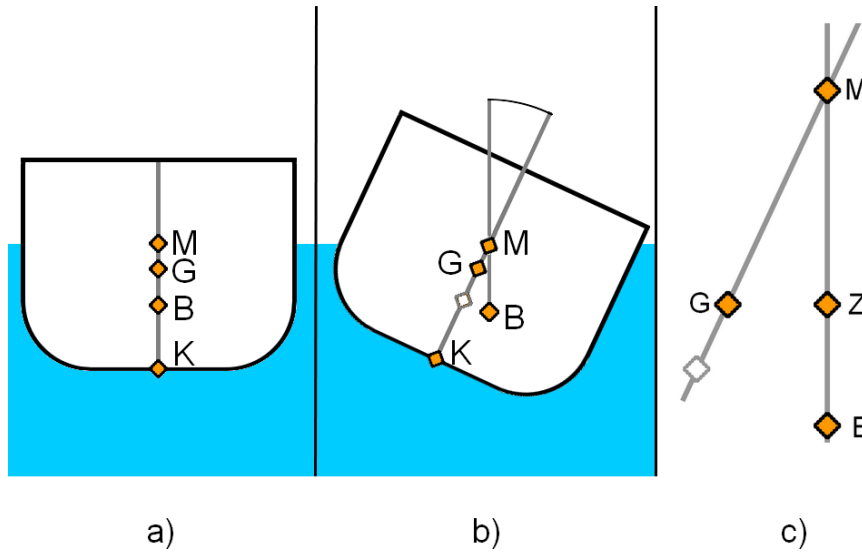


Abbildung 30 Metazentrische Höhe \overline{GM} und Hebelarm \overline{GZ}

Die metazentrische Höhe \overline{GM} ohne Auslenkung wird mit Gleichung (3.17) unter Zuhilfenahme der Gleichungen (3.18) und (3.19) berechnet. In den Gleichungen (3.18) und (3.19) stehen T für den Tiefgang des Schiffes (hier: $T = 22,15 \text{ m}$), B für die Schiffsbreite von $58,00 \text{ m}$ und $CG_z = -3,00 \text{ m}$ für die vertikale Lage des Schwerpunktes CG bzw. G . Mit $\overline{KB} = \frac{T}{2}$ wird die Lage des Auftriebszentrums in Bezug auf den Kiel angegeben. Der zweite Term $\frac{B^2}{12 \cdot T}$ in Gleichung (3.18) entsteht aus dem Quotienten des Flächenträgheitsmoments um die Längsachse $I_T = \frac{1}{12} \cdot L \cdot B^3$ und dem Verdrängungsvolumen eines quaderförmigen Schiffes $\nabla = L \cdot B \cdot T$.

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG} \quad (3.17)$$

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{12 \cdot T} \quad (3.18)$$

$$\overline{KG} = T + CG_z \quad (3.19)$$

Für die longitudinale metazentrische Höhe \overline{GM}_L gelten die beschriebenen Zusammenhänge sinngemäß, was zu den Gleichungen (3.20) und (3.21) führt. Aufgrund des wesentlichen größeren Flächenträgheitsmomentes in Längsrichtung ist auch die longitudinale metazentrische Höhe deutlich größer als die transversale. Für \overline{GM}_L ergibt sich mit Gleichung (3.20) für das verwendete Schiff ein Wert von $\overline{GM}_L = 411,62 \text{ m}$. Für die

transversale metazentrische Höhe erhält man mit Gleichung (3.17) $\overline{GM} = 4,58 \text{ m}$ als Ergebnis. Die transversale metazentrische Höhe \overline{GM} liegt bei Schiffen dieser Kategorie (VLCC: *Very Large Crude Carrier*, bzw. allgemein *double-hull supertanker*) typischerweise im Bereich von $\overline{GM} = [2 \dots 5] \text{ m}$ [41]. Für die longitudinale metazentrische Höhe \overline{GM}_L liegen keine entsprechenden Vergleichswerte vor.

$$\overline{GM}_L = \overline{KM}_L - \overline{KG} \quad (3.20)$$

$$\overline{KM}_L = \overline{KB} + \overline{BM}_L = \frac{T}{2} + \frac{L^2}{12 \cdot T} \quad (3.21)$$

Die vorgestellten Näherungen zur Ermittlung der metazentrischen Höhen \overline{GM} und \overline{GM}_L gelten für kleine Winkelauslenkungen bis $\pm 10^\circ$ und sind für Schiffe mit annähernd ebenen Seitenwänden gedacht [11]. Bei größeren Winkelauslenkungen sollte zusätzlich zur horizontalen Verschiebung des Auftriebszentrums auch dessen vertikale Verschiebung berücksichtigt werden [11]. Mit der sogenannten Scribanti-Gleichung (s. Gleichung(3.22)) wird der Abstand zwischen dem Auftriebszentrum und dem Metazentrum N_ϕ bestimmt, das etwas höher liegt als das initiale Metazentrum M bei $\phi = 0^\circ$ [11].

$$\overline{BN}_\phi = \frac{I_T}{\nabla} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2(\phi) \right) \quad (3.22)$$

$$\overline{GN}_\phi = \overline{KB} + \overline{BN}_\phi - \overline{KG} \quad (3.23)$$

Da für das verwendete Schiff und weitere bisher für die Simulation vorgesehene Schiffe keine Winkelauslenkungen von mehr als $\pm 10^\circ$ erwartet werden, erfolgen die Berechnungen von \overline{GM} und \overline{GM}_L innerhalb der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ gemäß den Gleichungen (3.17) und (3.20).

Ausgehend von den mit den Gleichungen (3.13) bis (3.15) berechneten Federkoeffizienten $c_{i,j}$ werden innerhalb der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ auch die hydrodynamischen Massen $a_{i,j}$ und Dämpfungskoeffizienten $b_{i,j}$ berechnet. Hierbei kommen die Gleichungen (3.24) und (3.25) zum Einsatz. Sie gelten in dieser Form für die Tauchbewegung. Sollen sie für die Rotationen verwendet werden, so muss die Masse m jeweils durch das entsprechende Massenträgheitsmoment ersetzt werden. Für die Koeffizienten a und b müssen in diesem Fall die Werte der Koeffizienten $a_{i,j}$ und $b_{i,j}$ für der jeweiligen Rotation verwendet werden. Zur Berechnung der Massenträgheitsmomente werden die beim Aufruf an die Funktion übergebenen auf eins normierten Faktoren für die Trägheitsradien m_rgx und m_rgy benötigt (vgl. Abbildung 26). Die Kreisfrequenz ω_0 ist die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz der jeweiligen ungekoppelten Einzelbewegung.

$$a = \frac{c}{\omega_0^2} - m \quad (3.24)$$

$$b = \frac{2 \cdot \kappa \cdot c}{\omega_0} \quad (3.25)$$

In der Gleichung der Eigenkreisfrequenz (Gleichung (3.26)) steht ν für den Dämpfungskoeffizienten. Für den Fall, dass $\nu^2 \ll \omega_0^2$, wird Gleichung (3.26) näherungsweise zu $\omega_z^2 \approx \omega_0^2$ [11]. Das bedeutet, dass die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz, die für Berechnung der Koeffizienten der Tauchbewegung mit den Gleichungen (3.24) und (3.25) benötigt wird, näherungsweise der gedämpften Eigenkreisfrequenz der Tauchbewegung ω_z entspricht. Der Dämpfungskoeffizient ν sollte nicht wesentlich größer als 0,2 sein, damit diese Näherung verwendet werden kann [11]. Die beschriebenen Zusammenhänge gelten sinngemäß auch für die beiden betrachteten Rotationen.

$$\omega_z^2 = \omega_0^2 - \nu^2 \quad (3.26)$$

Die für einen Abklingversuch (engl.: *free decay test*) der Tauchbewegung gültige Bewegungsgleichung (Gleichung (3.27)) lässt sich in Verbindung mit den Gleichungen (3.28) und (3.29) auch in Form von Gleichung (3.30) ausdrücken [11]. Bei einem Abklingversuch erhält das Schiff bzw. ein Modell des Schiffes eine Impulsauslenkung gegenüber der ruhenden Wasseroberfläche. Von der darauf folgenden Schwingung werden die Periodendauern und Amplituden der Eigenschwingung erfasst. Aus der Periodendauer der Eigenschwingung lässt sich die jeweilige gedämpfte Eigenkreisfrequenz bestimmen. Der Dämpfungskoeffizient ν ergibt, bezogen auf die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_0 , den dimensionslosen Dämpfungskoeffizienten κ (s. Gleichung (3.31)).

$$(m + a) \cdot \ddot{z} + b \cdot \dot{z} + c \cdot z = 0 \quad (3.27)$$

$$2\nu = \frac{b}{m + a} \quad (3.28)$$

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m + a} \quad (3.29)$$

$$\ddot{z} + 2\nu \cdot \dot{z} + \omega_0^2 \cdot z = 0 \quad (3.30)$$

$$\kappa = \frac{\nu}{\omega_0} \quad (3.31)$$

Zur Bestimmung von κ werden die über den Abklingversuch der jeweiligen Bewegungskomponente ermittelten Werte der Amplituden benötigt (s. Gleichung (3.32)). Die in Gleichung (3.32) enthaltenen Amplituden z_{a_n} sind die Amplituden der Tauchbewegung. Sie müssen zur Berechnung von κ für die anderen Bewegungskomponenten durch die Amplituden der jeweiligen Komponente ersetzt werden. In Gleichung (3.32) steht der Index n für die n -te Amplitude, wobei sowohl positive als auch negative Amplituden mitgezählt werden. Es werden also vier aufeinander folgende Amplituden verwendet, zwei positive und zwei negative.

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \left\{ \frac{z_{a_n} - z_{a_{n+1}}}{z_{a_{n+2}} - z_{a_{n+3}}} \right\} \quad (3.32)$$

Für das verwendete Schiff liegen keine Ergebnisse aus Abklingversuchen vor. Daher werden für die Bestimmung der dimensionslosen Dämpfungskoeffizienten mit Gleichung (3.32) Amplituden verwendet, die aus Impulsantwort-Diagrammen abgelesen werden können. Diese Diagramme sind für das Schiff ‚Vessel Type 1‘ in der Software OrcaFlex enthalten [32]. Mit diesen Amplituden und Gleichung (3.32) ergeben sich für die dimensionslosen Dämpfungskoeffizienten κ folgende Werte:

- für die Tauchbewegung: $\kappa = 0,51$
- für die Rollbewegung: $\kappa = 0,45$
- für die Stampfbewegung: $\kappa = 0,25$

Diese Werte werden innerhalb der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ für die Berechnung der Dämpfungskoeffizienten $b_{i,j}$ des Tankers ‚British Pioneer‘ nach Gleichung (3.25) verwendet.

Zur Bestimmung der Eigenkreisfrequenzen, die zur Berechnung der hydrodynamischen Massen und Dämpfungskoeffizienten mit den Gleichungen (3.24) und (3.25) erforderlich sind, werden noch die Periodendauern der Eigenschwingungen benötigt. Diese werden mit Hilfe einer groben Abschätzung bzw. Näherung für die hydrodynamischen Massen $a_{i,j}$ berechnet, welche genaugenommen erst bei Vorliegen der Periodendauern mit Gleichung (3.24) berechnet werden können. Der Ansatz nach Gleichung (3.33) liefert einen Faktor, mit dem die Masse bzw. bei den Rotationen das Massenträgheitsmoment multipliziert werden muss, um die dazugehörige hydrodynamische Masse zu erhalten [42]. Es wird angenommen, dass es sich dabei um eine empirische Formel handelt. In der Quelle werden dazu leider keine näheren Angaben gemacht.

$$a^* = \sqrt{0,6 + 0,36 \cdot \frac{\text{Breite}}{\text{Tiefgang}}} \quad (3.33)$$

Mit dem so bestimmten Faktor für die hydrodynamischen Massen a^* werden die Periodendauern der Eigenschwingen mit den Gleichungen (3.34) bis (3.36) berechnet und man erhält $T_z \approx 11,4 \text{ s}$, $T_\phi \approx 20,9 \text{ s}$ und $T_\theta \approx 10,3 \text{ s}$ als Ergebnis. Für die Verwendung dieser Gleichungen wird angenommen, dass es sich bei den Schiffsbewegungen vereinfacht betrachtet um einfache harmonische Bewegungen handelt [41].

$$T_z = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m \cdot a^{*2}}{\rho \cdot g \cdot A_{WL}}} \quad (3.34)$$

$$T_\phi = 2\pi \cdot \frac{k_{xx} \cdot a^*}{\sqrt{g \cdot \overline{GM}}} \quad (3.35)$$

$$T_\theta = 2\pi \cdot \frac{k_{yy} \cdot a^*}{\sqrt{g \cdot \overline{GM}_L}} \quad (3.36)$$

Wie an den Gleichungen zu erkennen ist, führen größere metazentrische Höhen bzw. eine bei gleicher Schiffsmasse m größere Wasserlinienfläche A_{WL} zu kleineren Periodendauern. Größere Trägheitsradien (k_{xx} und k_{yy}) bzw. eine größere Schiffsmasse bei gleicher Wasserlinienfläche bewirken größere Periodendauern. In der Funktion ‚Calculate_coefficients‘ werden aus diesen Periodendauern die gedämpften Eigenkreisfrequenzen ω_z , ω_ϕ und ω_θ bestimmt, welche aufgrund der oben beschriebenen Näherung als ungedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_0 in den Gleichungen (3.24) und (3.25) verwendet werden.

Die vorgestellte, auf Abklingversuchen basierende Methode zur Ermittlung der hydro-mechanischen Koeffizienten darf nur verwendet werden, solange keine Kopplungen der Bewegungskomponenten berücksichtigt werden [11]. Da die Abklingversuche bei nur einer Frequenz, nämlich der jeweiligen Eigenfrequenz, ablaufen, liefern sie keine Information über die Abhängigkeit zwischen den Koeffizienten und der jeweiligen Schwingungsfrequenz [11]. Daher sind die mit dieser Methode berechneten Koeffizienten strenggenommen auch nur für die jeweilige Eigenfrequenz gültig.

Tabelle 4 enthält neben den Ergebnissen der durch die Funktion ‚Calculate_coefficients‘ berechneten hydromechanischen Koeffizienten auch alle für die Berechnung benötigten und weitere Kennwerte für das Schiff ‚British Pioneer‘. Der Quellcode der Funktion befindet sich in Anhang A.

Länge L	334 m
Länge zwischen den Loten L_{pp}	320 m
Breite B	58 m
Verdrängungsmasse $m = \rho \nabla$	348817 t
Tiefgang T	22,15 m
Auf eins normierter Faktor für den Trägheitsradius um die Längsachse rgx	0,31
Auf eins normierter Faktor für den Trägheitsradius um die Querachse rgy	0,25
Vertikale Lage des Schwerpunktes CG_z	-3,00 m
Periodendauer der Taucheigenschwingung T_z	11,4 s
Periodendauer der Rolleigenschwingung T_ϕ	20,9 s
Periodendauer der Stampfeigenschwingung T_θ	10,3 s
Dimensionsloser Dämpfungskoeffizient für die Tauchbewegung κ_z	0,51
Dimensionsloser Dämpfungskoeffizient für die Rollbewegung κ_ϕ	0,45
Dimensionsloser Dämpfungskoeffizient für die Stampfbewegung κ_θ	0,25
Wasserlinienfläche A_{WL}	16181 m ²
Transversale metazentrische Höhe \overline{GM}	4,58 m
Longitudinale metazentrische Höhe \overline{GM}_L	411,62 m
Völligkeitsgrad der Wasserlinienfläche C_w	0,871837
Völligkeitsgrad der Verdrängung C_b	0,827794
Hydromechanische Koeffizienten für die Tauchbewegung	$a_{33} = 1,89290 \cdot 10^8 \text{ kg}$
	$b_{33} = 3,01813 \cdot 10^8 \text{ kg s}^{-1}$
	$c_{33} = 1,62707 \cdot 10^8 \text{ kg s}^{-2}$
Hydromechanische Koeffizienten für die Rollbewegung	$a_{44} = 6,11938 \cdot 10^{10} \text{ kg}$
	$b_{44} = 4,69988 \cdot 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$
	$c_{44} = 1,56762 \cdot 10^{10} \text{ kg s}^{-2}$
Hydromechanische Koeffizienten für die Stampfbewegung	$a_{55} = 1,31978 \cdot 10^{12} \text{ kg}$
	$b_{55} = 1,14941 \cdot 10^{12} \text{ kg s}^{-1}$
	$c_{55} = 1,40853 \cdot 10^{12} \text{ kg s}^{-2}$

Tabelle 4 Berechnungsgrundlagen und Ergebnisse der Koeffizienten

3.3.3.3 Verwendete Messpunkte für die Funktion ‚getSurfaceHeightAt‘

Mit der osgOcean-Funktion ‚getSurfaceHeightAt‘ wird für jede Iteration die Auslenkung der Wasseroberfläche an den verwendeten Messpunkten bestimmt. Für diese Abfragen werden in das erdfeste System transformierte körperfeste Punkte verwendet, so dass sich die entsprechenden Koordinaten bei jeder Positionsänderung des Schiffes entsprechend mit ändern. Abbildung 31 enthält eine Übersicht über die jeweils verwendeten Punkte für alle drei berücksichtigten Bewegungskomponenten.

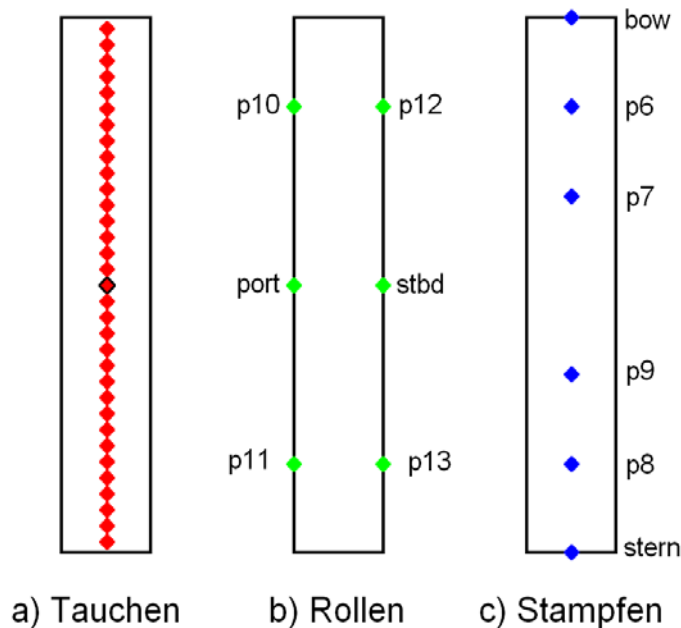


Abbildung 31 Verwendete Messpunkte für die Funktion ‚getSurfaceHeightAt‘

Für das in Abbildung 31 gezeigte Schiff wurden die Proportionen des Tankers ‚British Pioneer‘ verwendet. Damit und mit einem Abstand von zehn Metern zwischen den Messpunkten ergeben sich für die Tauchbewegung 33 Messpunkte (s. Abbildung 31 a). Abbildung 32 zeigt den dazugehörigen Quellcodeausschnitt. Darin werden, ausgehend vom horizontalen Mittelpunkt des Schiffes, innerhalb der while-Schleife die Messungen an den einzelnen Punkten in Richtung Schiffsbug (positive x-Richtung) und in Richtung Schiffsheck (negative x-Richtung) vorgenommen und aufsummiert (Variable ‚zw_sum‘). Der Abstand zwischen den Punkten lässt sich über die Variable ‚zw_dist‘ einstellen und beträgt hier zehn Meter. Zu dem aufsummierten Wert von ‚zw_sum‘ wird anschließend noch der am longitudinalen Mittelpunkt und Schwerpunkt gemessene Wert hinzuaddiert. Das Ergebnis daraus, dividiert durch die Anzahl aller für die Tauchbewegung abgefragten Punkte, ergibt die mittlere Auslenkung ‚medium_height‘. Dieser Mittelwert, der in guter Näherung die mittlere Wasserspiegelauslenkung für den Bereich einer Schiffslänge repräsentiert, kann näherungsweise auch als Mittelwert für die gesamte Wasserlinienfläche A_{WL} verwendet werden. In Abbildung 32 und allen weiteren Quellcodeausschnitten stehen ‚pos.x()‘ und ‚pos.y()‘ für die Koordinaten des in das OSG-Koordinatensystem transformierten horizontalen Mittelpunktes des Schiffes und geben somit dessen Position an. Beim OSG-Koordinatensystem zeigen die x-Achse positiv nach Osten und die y-Achse

positiv nach Norden. Damit entspricht für ein nach Norden ausgerichtetes Schiffsmodell die x-Achse des körperfesten Koordinatensystems (x_b) der OSG-y-Achse und die y_b -Achse zeigt in negative OSG-x-Richtung (vgl. Abschnitt 2.2.2). Es wird dabei vereinfachend davon ausgegangen, dass sich das körperfeste Koordinatensystem stets ohne Auslenkung in Ruhe befindet. Bei einer Wellenausbreitung in östliche Richtung entspricht das OSG-Koordinatensystem dem erdfesten Koordinatensystem $S(x_0, y_0, z_0)$ (vgl. Abschnitt 2.2.2).

```
//Ermittlung der mittleren Auslenkung der Wasseroberflaeche fuer die Tauchbewegung
int k = 0;
double zw_dist = 10.0;
int j = (int)m_length / (2 * (int)zw_dist);
if ((j * zw_dist) > m_length/2.0) j -=1; //verhindert eine Ueberschreitung der Schiffsenden
double zw_sum = 0.0;

while (k < j){
    double zw_pj = _oceanScene->getSurfaceHeightAt ( pos.x(), pos.y() + (double)k * zw_dist );
    zw_sum += zw_pj;
    double zw_nj = _oceanScene->getSurfaceHeightAt ( pos.x(), pos.y() - (double)k * zw_dist );
    zw_sum += zw_nj;
    k++;
}

zw_center = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() );

zw_sum += zw_center;
medium_height = zw_sum / (j+1);
```

Abbildung 32 Quellcodeausschnitt für die Messpunkte der Tauchbewegung

Die aus diesen Wellenauslenkungen ermittelte mittlere Auslenkung ‚medium_height‘ wird anschließend noch mit dem Reduzierungsfaktor e^{-kT} multipliziert, um die effektive Wasserspiegelauslenkung ζ^* zu erhalten (vgl. Gleichung (3.2)), die als Wellenanregung der Tauchbewegung in die Bewegungsgleichung einfließt (vgl. Gleichung (3.9)). Für die beiden Rotationen Rollen und Stampfen werden jeweils sechs Messpunkte verwendet (s. Abbildung 31 b) und c)). Die Punkte für die Rollbewegung befinden sich in der y-z-Ebene des Schiffes sowie von dort aus jeweils eine Drittel Schiffslänge in positive und in negative x-Richtung. Sie sind jeweils eine halbe Schiffsbreite von der x-z-Ebene in positive und in negative y-Richtung entfernt (vgl. Abbildung 31b)). Die Punkte für die Stampfbewegung befinden sich in der x-z-Ebene und sind von der longitudinalen Mitte jeweils eine sechstel, eine drittel und eine halbe Schiffslänge in positive und negative x-Richtung entfernt (vgl. Abbildung 31c)). Für die verwendeten Messpunkte wurden in Abbildung 31 und dem Quellcodeausschnitt in Abbildung 33 die gleichen Namen verwendet. Bei den Variablen steht ‚zw‘ für z-Auslenkung der Welle. Der zweite Teil der Variablennamen enthält den Namen des Messpunktes. So enthält zum Beispiel die Variable ‚zw_port‘ die Wellenauslenkung am Messpunkt ‚port‘ (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 33).

```

//Auslenkungen der Wasseroberflaeche fuer die Rollbewegung
zw_port = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x() - m_breadth/2.0 , pos.y() );
zw_p10 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x() - m_breadth/2.0, pos.y() + m_length/3.0 );
zw_p11 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x() - m_breadth/2.0, pos.y() - m_length/3.0 );

zw_starboard = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x() + m_breadth/2.0, pos.y() );
zw_p12 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x() + m_breadth/2.0, pos.y() + m_length/3.0 );
zw_p13 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x() + m_breadth/2.0, pos.y() - m_length/3.0 );

//Auslenkungen der Wasseroberflaeche fuer die Stampfbewegung
zw_bow = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() + m_length/2.0 );
zw_p6 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() + m_length/3.0 );
zw_p7 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() + m_length/6.0 );

zw_stern = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() - m_length/2.0 );
zw_p8 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() - m_length/3.0 );
zw_p9 = _oceanScene->getSurfaceHeightAt(pos.x(), pos.y() - m_length/6.0 );

```

Abbildung 33 Quellcodeausschnitt für die Messpunkte der Rotationen

3.3.3.4 Vereinfachte Bestimmung der Wellenneigungswinkel

Die Ermittlung der Wellenneigungswinkel wurde für die Sichtsimulation stark vereinfacht und basiert auf den vereinfachenden Annahmen und Näherungen über die Wellenneigungswinkel, die in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wurden. Für die beiden betrachteten Rotationen werden damit jeweils nur sechs Punkte für die Messung der Wellenauslenkung verwendet (vgl. Abbildung 31 b) und c)).

Die vereinfachte Methode soll am Beispiel der Stampfbewegung unter Verwendung von nur zwei Messpunkten erläutert werden. Es wird angenommen, dass die Wasseroberfläche am Schiffsbug um den positiven Wert z_1 und am Schiffsheck um den negativen Wert z_2 ausgelenkt wird. Beträgsmäßig sei z_1 größer als z_2 , so dass die Linie zwischen den beiden Punkten der Wasseroberfläche die Horizontalebene nicht im horizontalen Schiffsschwerpunkt bei Punkt 1 schneidet, sondern rechts davon (vgl. Abbildung 34 a). Der Wellenneigungswinkel in Längsrichtung berechnet sich dann nach Gleichung (3.37) (vgl. Abbildung 34 b). Sinngemäß dazu ergibt sich mit Gleichung (3.38) der Wellenneigungswinkel in Querrichtung. Damit positive Wellen-Querneigungswinkel in die gemäß dem verwendeten Koordinatensystem richtige Richtung zeigen, müssen z_1 auf der ‚Port‘-Seite (links) und z_2 auf der ‚Starboard‘-Seite (rechts) gemessen werden.

$$\theta_w = \arctan\left(\frac{z_1 - z_2}{L}\right) \quad (3.37)$$

$$\phi_w = \arctan\left(\frac{z_1 - z_2}{B}\right) \quad (3.38)$$

Da die Rotationen in der Simulation um den Schwerpunkt des Schiffes erfolgen sollen und das Schiff als Starrkörper (keine Verformung) angenommen wird, werden die betragsmäßig

unterschiedlich großen Auslenkungen z_1 und z_2 so behandelt, als wären sie betragsmäßig gleich groß (vgl. Abbildung 34 c). Damit ergibt sich mit Gleichung (3.39) die mittlere Auslenkung z_m . Die mit den Gleichungen (3.37) und (3.38) ermittelten Neigungswinkel ändern sich dadurch nicht.

$$|z_m| = \frac{(z_1 - z_2)}{2} \quad (3.39)$$

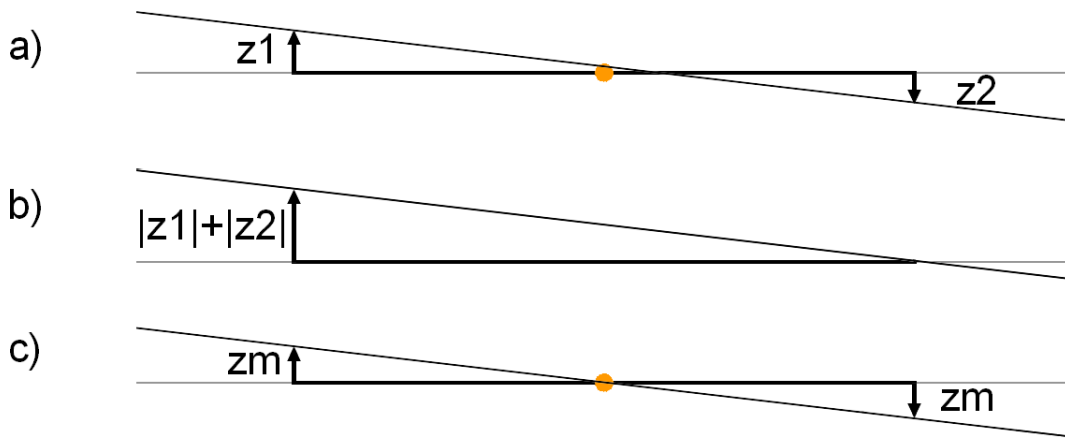


Abbildung 34 Vereinfachte Ermittlung der Wellenneigungswinkel

Für die verwendeten Messpunkte (vgl. Abbildung 31 b,c und Abbildung 33) ergeben sich nach dieser Methode mit der Schiffslänge L und der Schiffsbreite B mit den Gleichungen (3.40) und (3.41) die aus jeweils drei einzelnen Winkeln gemittelten Wellenneigungswinkel.

$$\theta_w = \arctan \left(\frac{(zw_{bow} - zw_{stern}) + (zw_{p6} - zw_{p8}) + (zw_{p7} - zw_{p9})}{2 \cdot L} \right) \quad (3.40)$$

$$\phi_w = \arctan \left(\frac{(zw_{port} - zw_{stbd}) + (zw_{p10} - zw_{p12}) + (zw_{p11} - zw_{p13})}{3 \cdot B} \right) \quad (3.41)$$

Sowohl die Roll- als auch die Stampfbewegung werden durch diese Verfeinerung der Methode genauer simuliert. Der Abstand zwischen den Messpunkten sollte stets kleiner als eine halbe Wellenlänge im Bereich der Peakfrequenz sein, um das Abtasttheorem zu erfüllen. Die Wellenlänge bei $f = f_p \approx 0,1 \text{ Hz}$ beträgt $\lambda \approx 156 \text{ m}$ (vgl. Gleichung (3.3)). Zwischen den Messpunkten für die Stampfbewegung liegt in x-Richtung jeweils ein Abstand von einer sechstel Schiffslänge, was beim verwendeten Schiff einem Wert von $55,6 \text{ m}$ entspricht. Die Messpunkte für die Rollbewegung liegen zwar in x-Richtung doppelt so weit auseinander, der relevante Abstand wird jedoch in y-Richtung gemessen

und beträgt 58,0 m, was der Schiffsbreite entspricht. Damit ist für das verwendete und alle kleineren Schiffe das Abtasttheorem sowohl für die Roll- als auch für die Stampfbewegung erfüllt ($58\text{ m} < \frac{156}{2}\text{ m}$ und $55,6\text{ m} < \frac{156}{2}\text{ m}$).

Für die Implementierung der Rotationen wurden, wie bei der Tauchbewegung, die effektiven Auslenkungen der Wasseroberfläche verwendet, wodurch aus den Gleichungen (3.40) und (3.41) die Gleichungen (3.42) und (3.43) werden. Analog zur effektiven Wasserspiegelauslenkung ergeben sich damit die effektiven Wellenneigungswinkel θ_w^* und ϕ_w^* , die in den Bewegungsgleichungen (3.10) und (3.11) die Winkel θ_w und ϕ_w und sinngemäß deren Ableitungen ersetzen.

$$\theta_w^* = \arctan \left(\frac{e^{-kT} \cdot ((zw_{bow} - zw_{stern}) + (zw_{p6} - zw_{p8}) + (zw_{p7} - zw_{p9}))}{2 \cdot L} \right) \quad (3.42)$$

$$\phi_w^* = \arctan \left(\frac{e^{-kT} \cdot ((zw_{port} - zw_{stbd}) + (zw_{p10} - zw_{p12}) + (zw_{p11} - zw_{p13}))}{3 \cdot B} \right) \quad (3.43)$$

3.3.3.5 Funktion zur Berechnung der Bewegungskomponenten

Innerhalb der Funktion ‚Calculate_motion‘ werden die Bewegungen gemäß den Bewegungsgleichungen (3.9), (3.10) und (3.11) berechnet sowie die erforderlichen numerischen Differentiationen und Integrationen ausgeführt. Da die Bewegungsgleichungen für alle drei betrachteten Bewegungskomponenten gleich aufgebaut sind, kann für alle drei Komponenten die gleiche Funktion verwendet werden. Dabei werden alle Variablen, deren Wert sich innerhalb der Funktion ändert, mit den neu berechneten Werten überschrieben. Dies wird durch den sogenannten Adressoperator ‚&‘ bewirkt, welcher in der Funktionsdefinition vor jeder dieser Variablen steht (s. Abbildung 35).

```
double Calculate_motion (double &wave_displ_now, double &wave_vel_now, double &wave_acc_now,
                        double &wave_displ_last, double &wave_vel_last, double &wave_acc_last,
                        double &displ_next, double &vel_next, double &acc_next,
                        double &displ_now, double &vel_now, double &acc_now,
                        double &displ_last, double &vel_last, double &acc_last,
                        double &Inertia, double &Spring, double &Damping,
                        double &Total, double &Total_d,
                        double a, double b, double c,
                        double mass, double step);
```

Abbildung 35 Definition der Funktion ‚Calculate_motion‘

Beim Aufruf der Funktion werden für die Auslenkungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Welle und des Schiffes jeweils die Werte des aktuellen und des vorangegangenen Zeitschritts übergeben. Für das Schiff finden sich auch Werte für den folgenden Zeitschritt im Funktionsaufruf. Diese ‚next‘-Werte entsprechen beim Funktionsaufruf noch den ‚now‘-Werten des letzten Zeitschritts. Sie werden innerhalb der Funktion nicht verwendet, aber am Ende der Funktion mit den Ergebnissen der Integrationen überschrieben. Die Variablen ‚Inertia‘, ‚Spring‘, ‚Damping‘, ‚Total‘ und ‚Total_d‘ enthalten die Kräfte bzw. Momente, mit denen innerhalb der Funktion gerechnet wird. Sie werden als Variablen im Funktionsaufruf nur dann benötigt, wenn diese Größen auch außerhalb der Funktion verwendet werden sollen, zum Beispiel für eine Aufzeichnung der Werte während der Simulation. An der Stelle der Variablen ‚a‘, ‚b‘ und ‚c‘ werden der Funktion die hydro-mechanischen Koeffizienten der jeweiligen Bewegungskomponente übergeben. Außerdem enthält der Funktionsaufruf die Verdrängungsmasse des Schiffes sowie den Wert der Zeitdifferenz zwischen dem letzten und dem aktuellen Zeitschritt. Abbildung 36 zeigt den Aufruf der Funktion ‚Calculate_motion‘ für die Tauchbewegung. Über boolesche Variablen, deren Werte global vor Aufruf der Klasse ‚BoatPositionCallback‘ gesetzt werden, können einzelne Bewegungskomponenten zu Testzwecken auch abgeschaltet werden. Der Aufruf der Funktion ‚Calculate_motion‘ für die jeweilige Komponente erfolgt nur, wenn die entsprechende boolesche Variable den Wert ‚true‘ bzw. ‚1‘ hat (vgl. Abbildung 36). Anhang B enthält den Quellcode für die gesamte Funktion ‚Calculate_motion‘.

```
if (heave == true){
    Calculate_motion (zw_eff_now, zw_eff_dot_now, zw_eff_2dot_now,
                     zw_eff_last, zw_eff_dot_last, zw_eff_2dot_last,
                     z_next, z_dot_next, z_2dot_next,
                     z_now, z_dot_now, z_2dot_now,
                     z_last, z_dot_last, z_2dot_last,
                     T, A, D, F_z, F_z_d,
                     a33, b33, c33,
                     m_mass, t_step);
}
```

Abbildung 36 Aufruf der Funktion ‚Calculate_motion‘ für die Tauchbewegung

3.3.3.6 Numerische Integrationen und Differentiationen

Innerhalb der Funktion ‚Calculate_motion‘ werden auch numerische Differentiationen und Integrationen durchgeführt. Die Wellenauslenkung in z-Richtung wird zweimal nach der Zeit differenziert, um die Wellengeschwindigkeit und die Wellenbeschleunigung zu erhalten, welche beide für die Bewegungsgleichung der Tauchbewegung benötigt werden. Im Falle der Rotationen werden an dieser Stelle die Wellenneigungswinkelauslenkungen differenziert, was Wellenneigungswinkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen liefert. Bei dem verwendeten Verfahren handelt es sich um ein Rückwärtsdifferenzenverfahren. Es basiert auf der Verwendung eines einseitigen Differenzenquotienten (s. Gleichung (3.44)). Von der zu differenzierenden Größe werden jeweils der aktuelle Wert und der Wert aus

dem vorangegangenen Zeitschritt benötigt. Der Parameter h steht in den Gleichungen (3.44) und (3.45) für die Schrittweite, welche in diesem Fall die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Schritten ist. Da die Werte der Wellenauslenkungen (Translation und Winkel) nicht äquidistant sind (d.h. $h \neq \text{const.}$), bietet sich die Verwendung eines zentralen Differenzenquotienten nicht an.

$$u'(t) = \frac{u(t) - u(t - h)}{h} \quad (3.44)$$

Das eingesetzte Differenzenverfahren nach Gleichung (3.44) verfügt über eine Konsistenzordnung von eins (vgl. [43]). Um aus den Beschleunigungen und Winkelbeschleunigungen des Schiffes die dazugehörigen Geschwindigkeiten und Auslenkungen zu erhalten, muss nach der Zeit integriert werden. Als numerisches Integrationsverfahren wird das Adams-Bashforth Verfahren zweiter Ordnung verwendet, das abgekürzt auch als ‚AB 2‘ bezeichnet wird (s. Gleichung (3.45)). Vom Integranden werden dazu jeweils der aktuelle Wert (Index n) und der Wert aus dem vorangegangenen Zeitschritt (Index $n - 1$) benötigt. In Gleichung 3.21 stehen f und f_{n-1} für die Werte des Integranden und y und y_{n+1} für die Integralwerte. Die globale Konsistenzordnung der Adams-Bashforth Verfahren beträgt $m + 1$ mit dem Grad m für die Interpolationspolynome (vgl. [44]). Für das Adams-Bashforth Verfahrens zweiter Ordnung ergibt sich damit eine globale Konsistenzordnung von zwei.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2}(3 \cdot f_n - f_{n-1}) \quad (3.45)$$

Für den vorgesehenen Zweck scheint die mit dem Adams-Bashforth Verfahren zweiter Ordnung erzielte Genauigkeit auszureichen. Sie hängt ab von der Schrittweite h , welche unter der Verwendung ausreichend leistungsfähiger Hardware nur von der Framerate abhängt. Die Framerate ist durch die Grafikkarte auf 60 Hz begrenzt. Das entspricht einer Schrittweite von $h = 0.01\bar{6} \text{ s}$. Mit der verwendeten Zeitfunktion (vgl. Abschnitt 3.3.3.1) können Schwankungen der Schrittweite in der Größenordnung von 10^{-4} s festgestellt werden (s. Abbildung 37).

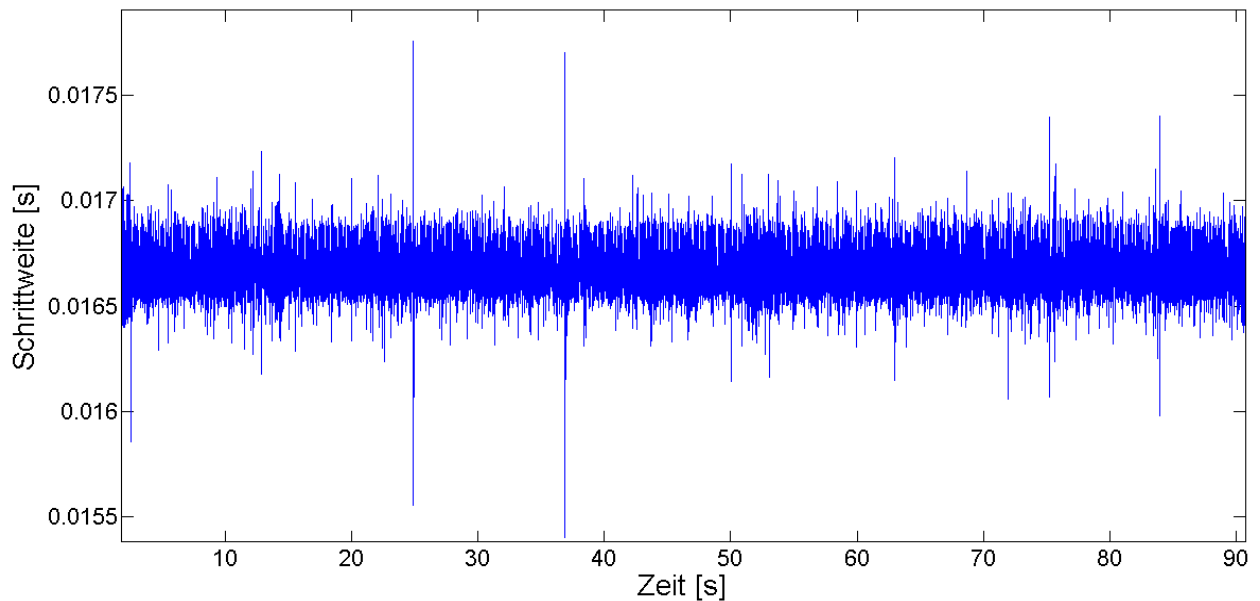


Abbildung 37 Streuung der Schrittweite bei einer Framerate von 60 Hz

Soll ein Verfahren höherer Ordnung verwendet werden, so sollte für die Schrittweite h jeweils der Mittelwert der relevanten Schritte verwendet werden, um den durch nicht konstante Schrittweite entstehenden Fehler zu verringern. Damit ließen sich die tatsächlichen Bewegungen insbesondere in den Bereichen nach stärkeren Änderungen (Umkehrpunkte) genauer annähern. Um zum Beispiel das Adams-Bashforth Verfahren dritter Ordnung („AB 3“) verwenden zu können, müssten zusätzlich zu den $n - 1$ ’-Werten auch noch die Werte des vorletzten Schrittes (Index $n - 2$) in die Berechnungen einbezogen werden (s. Gleichung (3.46)).

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{12} (23 \cdot f_n - 16 \cdot f_{n-1} + 5 \cdot f_{n-2}) \quad (3.46)$$

Durch den Einsatz eines Verfahrens höherer Ordnung ließen sich glattere Bewegungsverläufe erreichen, was sich besonders bei bewegten Objekten bemerkbar macht, die aus der Nähe betrachtet werden. Für Schiffsdecklandungen mit einem Hubschrauber wäre dieser Verbesserungsschritt daher möglicherweise sinnvoll. Bei größerer Distanz zwischen dem Betrachter und dem bewegten Schiff dürfte eine der tatsächlich darzustellenden Bewegung überlagerte Oszillation mit $f \approx 25 \text{ Hz}$ und Amplituden im Millimeterbereich (s. Abbildung 38) jedoch kaum auffallen. Eventuell können die in den Auslenkungen auftretenden Oszillationen auch mit Hilfe eines Filters geglättet werden, bevor die Bewegungen ausgeführt werden.

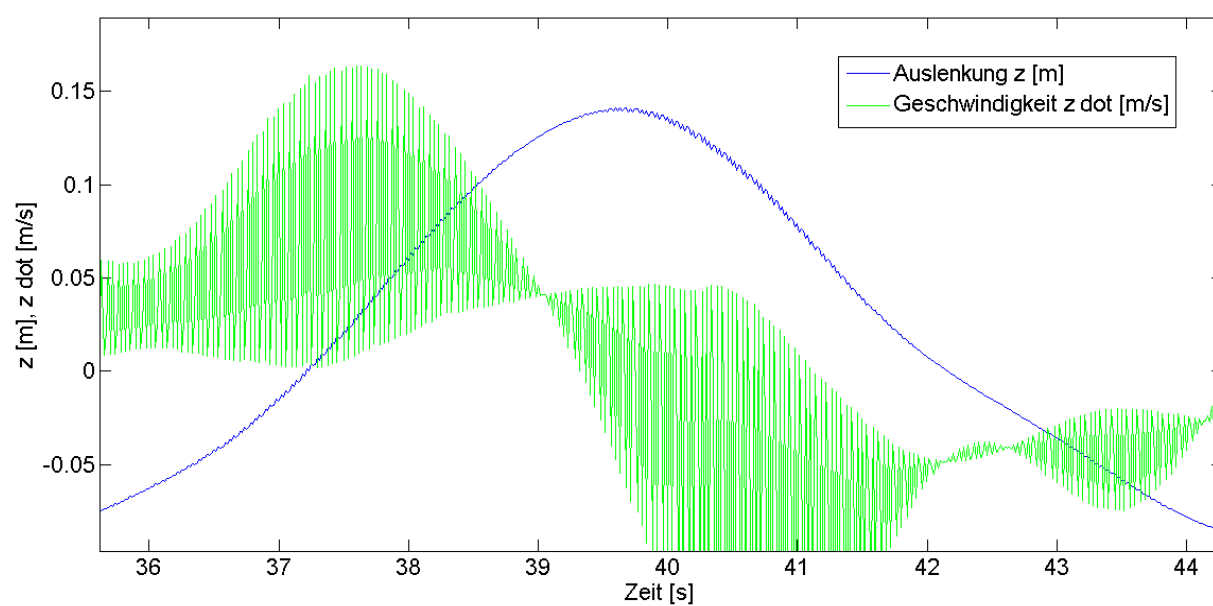


Abbildung 38 Oszillationen in der Tauchbewegung

3.3.4 Ergebnisse und Verifizierung der Schiffsdynamik

Die Verifizierung der implementierten Schiffsdynamik erfolgt qualitativ auf der Grundlage theoretischer Zusammenhänge und dem Vergleich aufgezeichneter Versuchsdaten mit verfügbaren Daten aus Messungen mit dem Tanker ‚Vessel Type 1‘. Dazu wurde für jede Bewegungskomponente in der Simulation ein Abklingversuch durchgeführt. Das Schiff wird dazu gegenüber der ruhenden Wasseroberfläche in jeweils nur einem Freiheitsgrad ausgelenkt. Da neben dieser Auslenkung keine äußeren Anregungen durch Wellen wirken und in den verwendeten Bewegungsgleichungen keine Kopplungen berücksichtigt werden, ist gewährleistet, dass nur der Bewegungsverlauf des jeweils betrachteten Freiheitsgrades aufgezeichnet wird. Um dagegen bei eingeschalteten Wellen einzelne Bewegungskomponenten abzuschalten, müsste die entsprechende boolesche Variable auf ‚false‘ bzw. ‚0‘ gesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.3.3.5). Für die Abklingversuche wurden folgende Anfangsauslenkungen verwendet:

- Tauchbewegung: $z = 10 \text{ m}$
- Rollbewegung: $\phi = 5^\circ$
- Stampfbewegung: $\theta = 1^\circ$

Die Winkelauslenkungen entsprechen beim verwendeten Schiff Höhendifferenzen von $2,91 \text{ m}$ an Bug und Heck, sowie $2,53 \text{ m}$ an Backbord und Steuerbord. Abbildung 39 zeigt den Verlauf der drei Auslenkungen z (rot), ϕ (grün) und θ (blau) für die jeweiligen Abklingversuche. Es fällt auf, dass die Rollbewegung stark gedämpft ist, so dass kaum ein Überschwingen auftritt. Ein solches einfaches Überschwingen ist vorteilhaft für ein schnellstmögliches Abklingen der Bewegung. Eine Ursache für das bei der Rollbewegung beobachtete Abklingverhalten liegt in der großen metazentrischen Höhe \overline{GM} . Diese wird hervorgerufen durch den tiefen vertikalen Schwerpunkt von $CG_z = -3,00 \text{ m}$, dessen tatsächlicher Wert unbekannt ist und der daher auf einer Abschätzung basiert. Die vertikale Schwerpunktlage wirkt sich auf die transversale metazentrische Höhe \overline{GM} und damit auf die Rollbewegung aufgrund der wesentlich kleineren Trägheit um die Längsachse deutlich stärker aus als auf die longitudinale metazentrische Höhe \overline{GM}_L und die damit verbundene Stampfbewegung (vgl. Gleichungen (3.18) und (3.21)). Die Periodendauer der Rolleigenschwingung wird bei Zunahme der metazentrischen Höhe \overline{GM} kleiner. Diese Zusammenhänge lassen die tiefe vertikale Schwerpunktlage als Ursache für die festgestellten Unterschiede im Abklingverhalten der beiden Bewegungen plausibel erscheinen. Ein weiterer Faktor, der großen Einfluss auf das Abklingverhalten hat, ist der dimensionslose Dämpfungskoeffizient κ , der für das verwendete Schiff in Rollrichtung möglicherweise etwas zu groß ist. Ein geringerer Wert für κ_ϕ würde zu einem deutlicher ausgeprägten Überschwingen beim Abklingen der Rollbewegung führen. Auch das Abklingen der Tauchbewegung könnte mit einem kleineren dimensionslosen Dämpfungskoeffizienten auf diese Weise positiv beeinflusst werden. Bei der Stampfbewegung scheint das Dämpfungsverhalten zu stimmen, wie ein Vergleich mit den Diagrammen für ‚Vessel Type 1‘ aus OrcaFlex zeigt (s. Abbildung 40). Zusammenfassend

betrachtet scheint der dimensionslose Dämpfungskoeffizient κ stärker schiffsabhängig zu sein, als zunächst vermutet wurde. Da die verwendeten Werte für κ jedoch auf den Amplituden der Abklingversuche eines vergleichbaren Schiffes (gleicher Schiffstyp) basieren, wurde von einer starken Ähnlichkeit und somit guten Anwendbarkeit dieser Dämpfungskoeffizienten für den Tanker ‚British Pioneer‘ ausgegangen.

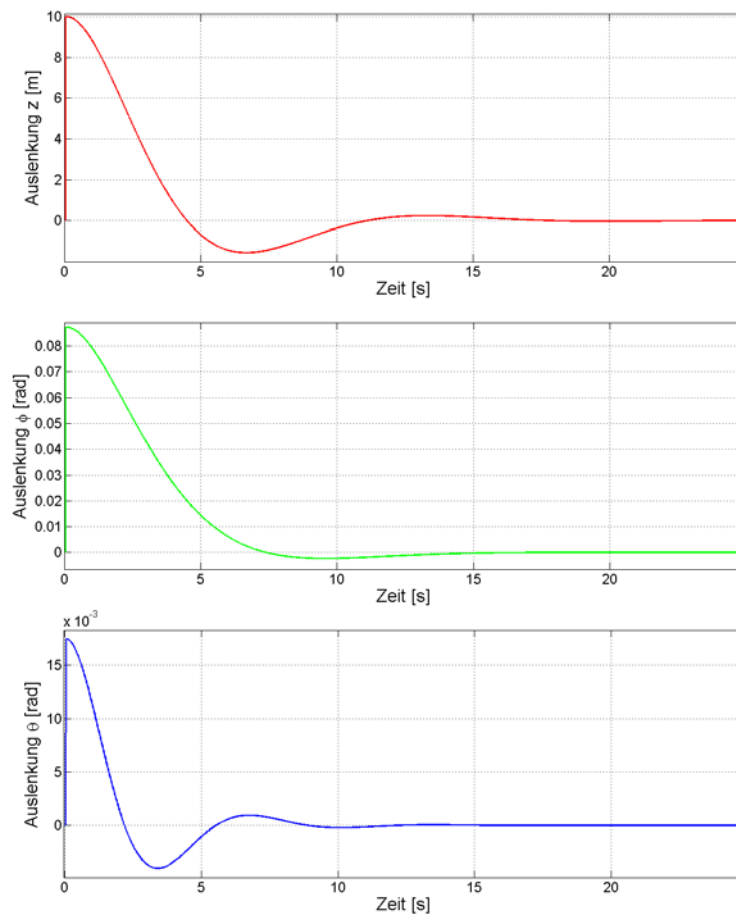


Abbildung 39 Auslenkungen von z , ϕ und θ bei Abklingversuchen

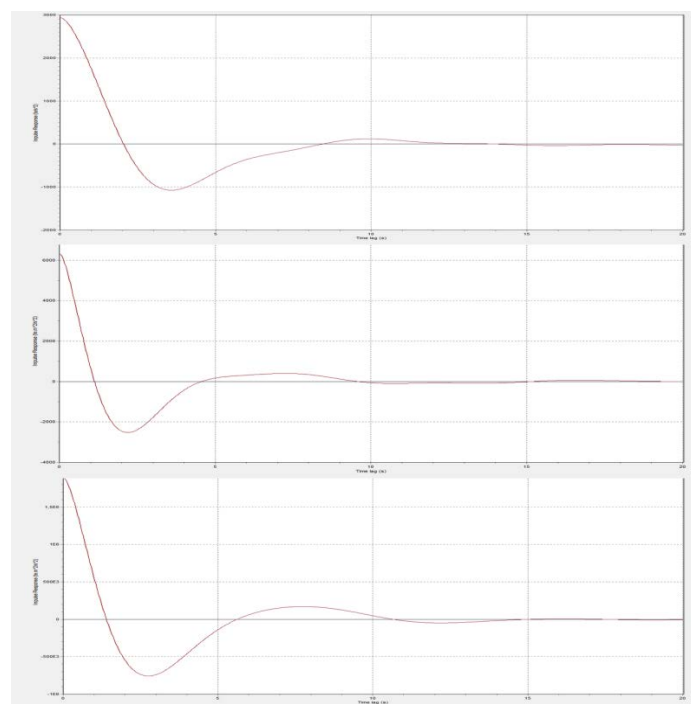


Abbildung 40 Impulsantworten für Tauchen, Rollen und Stampfen aus OrcaFlex

Während der Bewegung überträgt das Schiff die Energie, die es durch die Auslenkung erhalten hat, auf den Dämpfer (die Wasseroberfläche). In der Realität findet also ein Energietransfer zwischen dem Schiff und der Wasseroberfläche statt. Dies führt dazu, dass die Wasseroberfläche infolge der Schiffsbewegung beginnt, sich zu bewegen (kinetische Energie) und zu verformen (potentielle Energie). Dieser Effekt wird in der Sichtsimation jedoch nicht mit berücksichtigt. Die Energie wird zwar an den Dämpfer abgegeben, aber die dadurch verursachte Verformung und Bewegung der Wasseroberfläche werden nicht simuliert bzw. dargestellt. Bei der Dämpfung der Schiffsbewegungen handelt es sich um eine viskose Dämpfung, die sich dadurch auszeichnet, dass sie geschwindigkeitsproportional ist [45]. Die Amplituden der Auslenkungen in Abbildung 39 fallen damit exponentiell ab. Die Proportionalität der Dämpfungskraft zur Geschwindigkeit ist auch an der für den Abklingversuch der Tauchbewegung gültigen Gleichung (3.27) zu erkennen, worin die Dämpfungskraft $F_D = b \cdot \dot{z}$ beträgt. Abbildung 41 zeigt diesen Zusammenhang, basierend auf Messungen aus der Simulation, deutlich. Auffällig an Abbildung 41 ist, dass die Dämpfungskraft bei einer negativen Geschwindigkeit positiv ist, und umgekehrt. Dies ist auf die positiv nach oben gerichtete z-Achse des verwendeten Koordinatensystems zurückzuführen (vgl. Abschnitt 2.2.2).

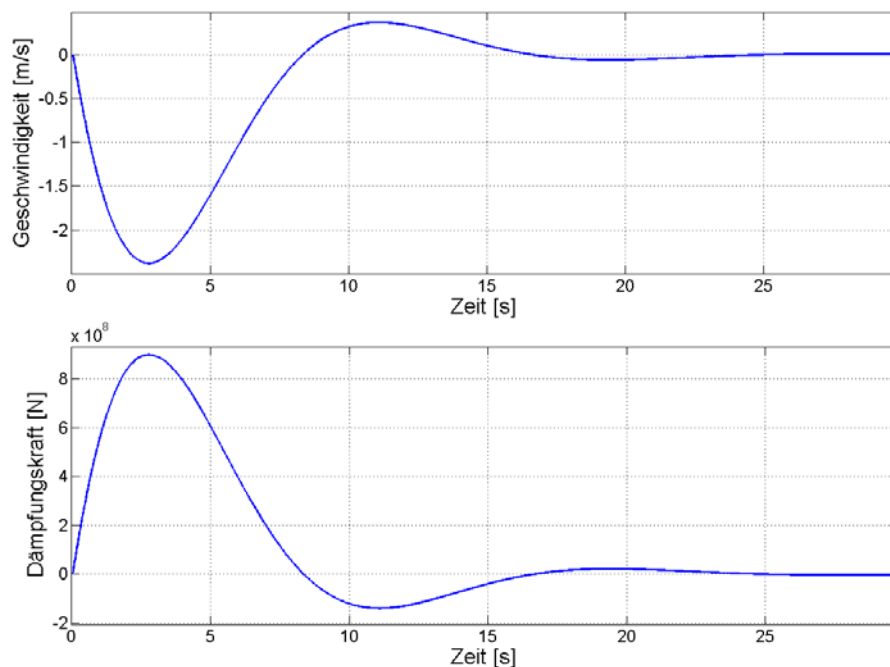


Abbildung 41 Geschwindigkeit und Dämpfungskraft der Tauchbewegung

In den Diagrammen in Abbildung 42 sind für den gleichen Abklingversuch die Beschleunigung und die gedämpfte Gesamtkraft über der Zeit aufgetragen. Im Unterschied zur Geschwindigkeit und Dämpfungskraft verhalten sich diese beiden Größen gleichsinnig.

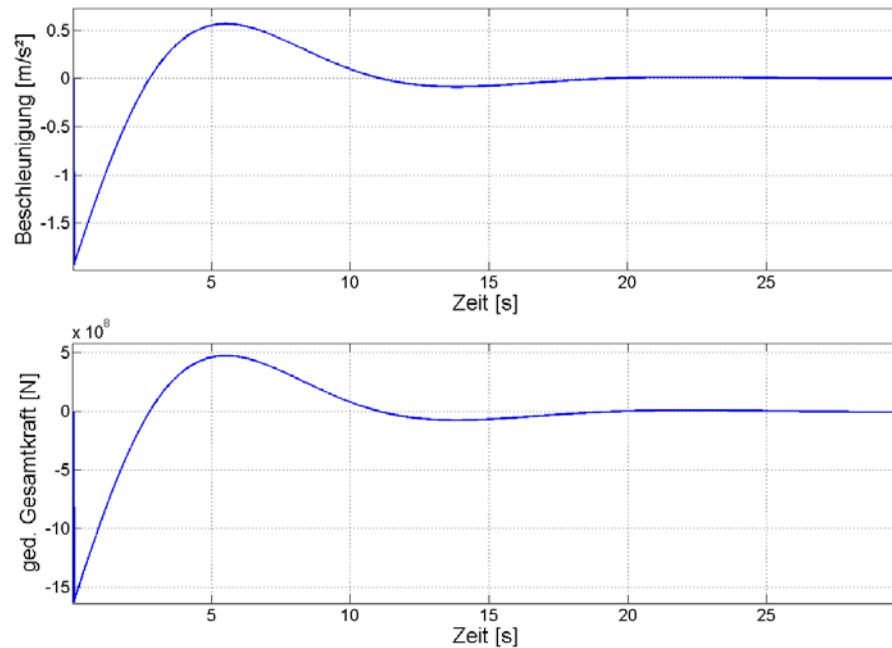


Abbildung 42 Beschleunigung und gedämpfte Gesamtkraft der Tauchbewegung

In Abbildung 43 ist der Verlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Auslenkung über der Zeit für einen Abklingversuch mit dem Schiff ‚British Pioneer‘ am Beispiel der Tauchbewegung dargestellt.

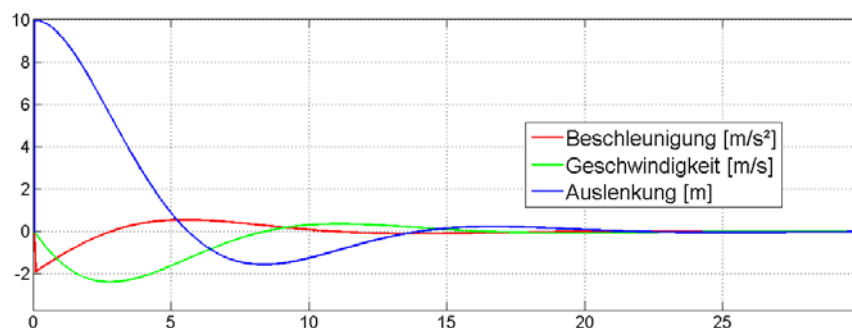


Abbildung 43 Größen der Tauchbewegung beim Abklingversuch

Das Verhalten des Schiffes in Wellen ist für alle drei betrachteten Bewegungskomponenten in Abbildung 44 dargestellt. Darin sind jeweils die Wellenanregung mit rot und die Auslenkung des Schiffes mit blau eingezeichnet. Die für diese Aufzeichnung enthaltenen Wellen basieren auf einem Wind aus 045° mit einer Geschwindigkeit von 12 m/s. Es ist zu beachten, dass es sich bei den in Abbildung 44 dargestellten Wellenanregungen um effektive Wellenauslenkungen handelt (Tauchen), bzw. dass sie auf effektiven Wellenauslenkungen basieren (Rollen, Stampfen). Die erkennbare Gleichmäßigkeit der Anregungen und Auslenkungen ist auf die von osgOcean verwendete Methode zur Erzeugung der bewegten Wasseroberfläche zurückzuführen. Sie ist die Ursache dafür, dass sich der gleiche Bewegungsablauf immer wieder wiederholt, solange sich die Position des Schiffes auf der Wasseroberfläche nicht ändert. Da bei der Ermittlung der einzelnen

Anregungen jeweils Mittelwerte bestimmt werden, die das gesamte Schiff repräsentieren sollen (vgl. Abschnitt 3.3.3.3), nähern sich die so bestimmten Anregungen und damit auch die Auslenkungen Sinussignalen an, was an den Diagrammen in Abbildung 44 deutlich zu erkennen ist. Im Falle der Tauchbewegung ist dieser Effekt am stärksten ausgeprägt, da hier die Anzahl der verwendeten Messpunkte deutlich größer ist als bei den Rotationen (vgl. Abbildung 31). Während bei der Tauchbewegung eine leichte Verzögerung zwischen Anregung und Systemantwort und etwas größere Amplituden der Antwort zu erkennen sind, ist dies bei den Rotationen nicht der Fall. Hier scheinen die als Anregung verwendeten, näherungsweise für die gesamte Wasserlinienfläche gültigen Wellenneigungswinkel durch das System kopiert zu werden. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass es sich sowohl bei der Wasseroberfläche, welche entsprechend des jeweiligen Freiheitsgrades als geneigt betrachtet wird, als auch bei der Unterseite des Schiffes gemäß der angenommenen Vereinfachungen (vgl. Abschnitt 3.3.2) um Ebenen handelt.

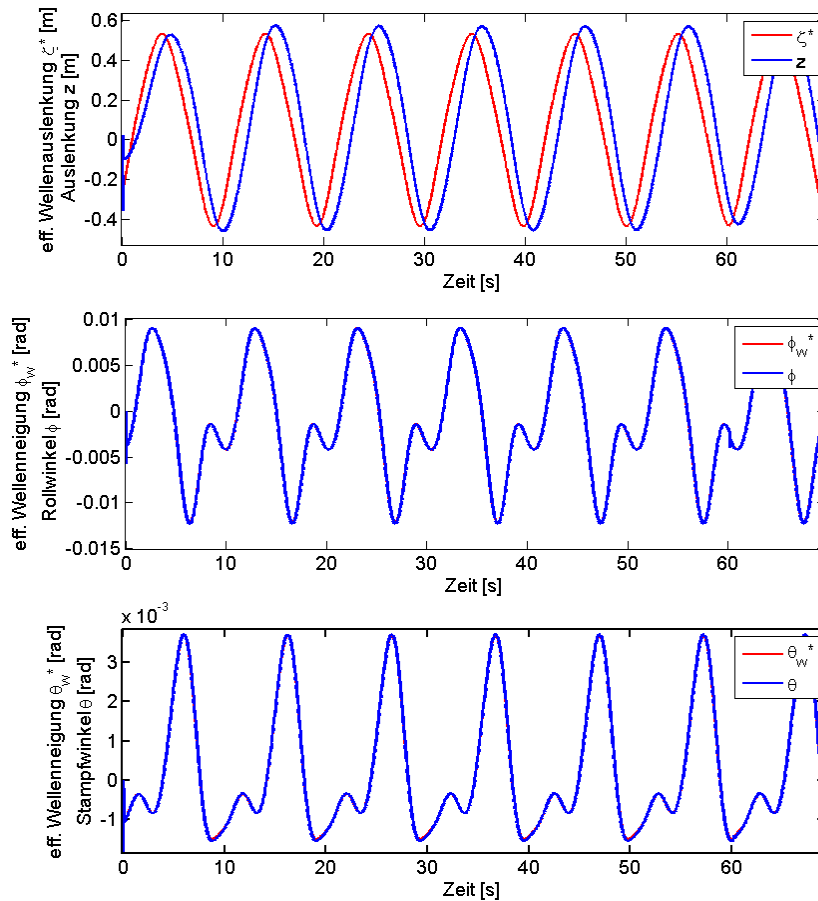


Abbildung 44 Schiffsbewegungen Tauchen, Rollen und Stampfen bei Seegang

Die Genauigkeit der Näherungsgleichung für die Wasserlinienfläche A_{WL} (Gleichung (3.16)) lässt sich mit Hilfe der Größe TPC (engl.: *Tonnes Per Centimetre immersion*) bestimmen, die für den Tanker ‚British Pioneer‘ bekannt ist ($TPC = 173 \text{ t cm}^{-1}$) [29]. Der Kennwert TPC gibt an, welche Änderung der Schiffsmasse für eine Änderung des Tiefgangs um einen Zentimeter in Salzwasser erforderlich ist (s. Gleichung (3.47)) [41].

$$TPC = A_{WL} \cdot \rho \cdot 10^{-5} \quad (3.47)$$

Mit dem bekannten Wert für TPC erhält man damit für die Wasserlinienfläche bei einer Wasserdichte von $\rho = 1025 \text{ kg m}^{-3}$ einen Sollwert von $A_{WL} = 16878,04 \dots \text{m}^2$. Der mit Gleichung (3.16) bestimmte Wert von $A_{WL} = 16181,29 \dots \text{m}^2$ ist damit rund 4,1 % zu klein. Da die Wasserlinienfläche nur für die Berechnung der Federkoeffizienten $c_{i,j}$ nach Gleichung (3.13) verwendet und dabei nicht potenziert wird, wird die Genauigkeit der Näherungsgleichung jedoch als akzeptabel eingestuft.

3.3.5 Verhalten bei Vorwärtsfahrt

Bei Vorwärtsfahrt ändert sich die Begegnungskreisfrequenz ω_e zwischen Schiff und Wellen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Je nachdem in welche Richtung sich die Wellen relativ zum Geschwindigkeitsvektor V des Schiffes ausbreiten, können dabei einzelne Bewegungskomponenten verstärkt oder abgeschwächt auftreten. So wird zum Beispiel die Rollbewegung bei Querwellen mit zunehmender Vorwärtsfahrt stärker gedämpft [1]. Bei Frontalwellen wird die Stampfbewegung mit zunehmender Fahrt verstärkt. Ob diese Effekte auch in der Simulation auftreten, konnte noch nicht überprüft werden. Es wird jedoch angenommen, dass die entsprechenden Effekte in der Simulation in ähnlicher Weise auch beobachtet und gegebenenfalls auch gemessen werden können. Dies hängt davon ab, ob sich außerhalb der für den Entwurf der Schiffsdynamik verwendeten Testumgebung auch die Parameter der Wellen- und Schiffsbewegungen aufzeichnen lassen. In Abbildung 45 sind die Übertragungsfunktionen (RAO) der Rollbewegung und der Stampfbewegung für ein Containerschiff bei verschiedenen Geschwindigkeiten gezeigt. Die Roll-RAO wurden darin bei Querwellen und die Stampf-RAO bei Frontalwellen ermittelt. Die oben beschriebenen Dämpfungs- und Verstärkungseffekte sind in Abbildung 45 gut wiederzuerkennen. Sie werden durch eine mit Vorwärtsfahrt zunehmende Auftriebsdämpfung der Rollbewegungen hervorgerufen [1].

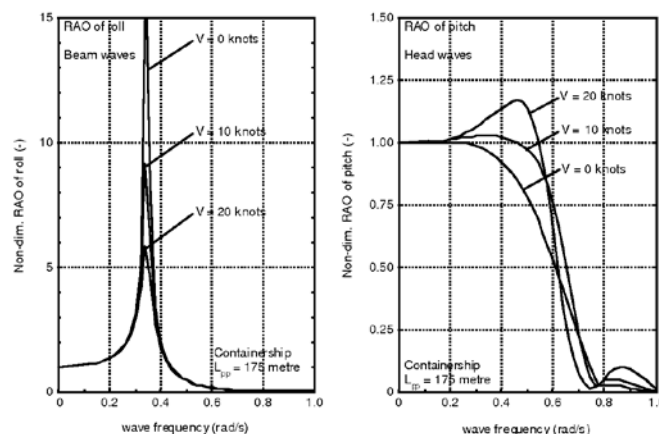


Abbildung 45 Roll- und Stampf RAO's eines Containerschiffs

Quelle: [1], S. 45

3.4 Dynamische Elemente: Offshore-Windkraftanlagen

3.4.1 Verwendete Modelle

Die verwendeten Windkraftanlagenmodelle (s. Abbildung 46) wurden bereits vor Beginn dieser Arbeit im Rahmen einer studentischen Tätigkeit durch den Autor erstellt. Alle drei Anlagentypen verfügen in der Realität über ähnliche Dimensionen. Daher wurden für die 3D-Modelle aller drei Anlagen die gleichen Abmessungen verwendet (s. Tabelle 5).

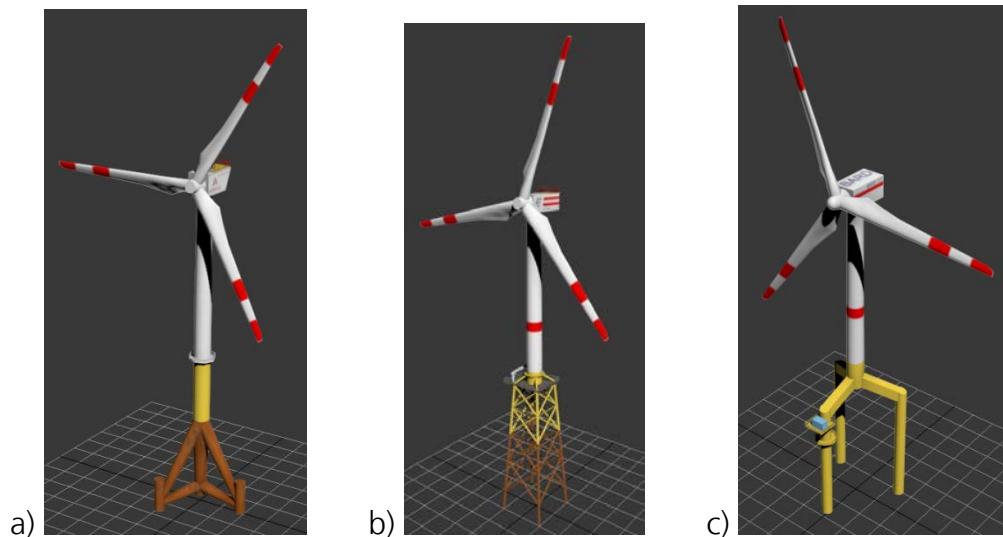


Abbildung 46 3D-Modelle der Offshore-Windkraftanlagen

(a: AREVA Multibrid M5000, b: REPower 5M, c: BARD 5.0)

	Simulation (gleiche Werte für alle Modelle)	Realität
Rotordurchmesser	122 m	116 m (AREVA), 122 m (BARD), 126 m (REPower)
Höhe der Rotornabe über der Wasseroberfläche	90 m	90 m (AREVA), 90 m (BARD), 92 m (REPower)
Höhe ab Wasserlinie	150 m	148 m (AREVA), 152 m (BARD), 155 m (REPower)

Tabelle 5 Dimensionen der verwendeten WKA-Modelle

3.4.2 Animation der Modelle

Die Animation der Modelle wird zurzeit über eine xml-Konfigurationsdatei gesteuert. Hierin können die Generatorgondeln samt Rotor jeweils gemeinsam um die Hochachse gedreht werden, um die Anlagen zum Wind auszurichten („Windrichtungsnachführung“, vgl. Abschnitt 2.3.3). Dazu wird in der xml-Datei die Orientierung der entsprechenden Baugruppe festgelegt. Die in Abbildung 47 gezeigte Konfiguration lässt die den Rotor der

Windkraftanlage mit einer Frequenz von $0,2\text{ Hz}$ bzw. zwölf Umdrehungen pro Minute um die lokale x-Achse des Modells drehen. Alle Konfigurationsdaten, die einem „ANIM“-Objekt zugewiesen werden, lassen sich auch über einen UDP-Sender verändern. Damit besteht zum Beispiel die Möglichkeit, die Drehgeschwindigkeit des Windkraftanlagenrotors von der in der Simulation verwendeten Windgeschwindigkeit abhängig zu machen. Diese kann während der Simulation über eine Bedienoberfläche entweder manuell oder automatisch und dynamisch durch ein parallel laufendes Wettermodell verändert werden. Das zurzeit verwendete Wettermodell enthält diese Dynamik, mit der sich auch der über osgOcean erzeugte Seegang beeinflussen ließe, noch nicht. Noch eine Stufe weiter ließe sich auch die Aerodynamik der Windkraftanlagen mit berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.3). Eine Verstellung der Blatteinstellwinkel der Windkraftanlagenrotoren über die xml-Datei ist derzeit schon möglich. In Abbildung 47 ist die Ansteuerung einzelner Blätter jedoch nicht mit dargestellt.

```
<object type="ANIM">
  <file>D:\visualsim\WKA\AV3_3deg_jacket_v10.dae</file>
  <name>AV 1</name>
  <position>54.024019979, 6.579537662, -35.5</position>
  <orientation>0, 0, 0</orientation>
  <animation>
    <node>
      <id>node-Gondel_Rotor</id>
      <value>0, 0, 0, 0, 0, 195</value>
    </node>
    <node>
      <id>node-BaugruppeRotor</id>
      <value>0, 0, 0, 0, 0, 0</value>
      <value type="ROT_X">0, 360, 0.2</value>
    </node>
  </animation>
</object>
```

Abbildung 47 Konfiguration eines WKA-Modells über xml

4 Obstacle-City

Bei Obstacle City handelt es sich um ein Stadtszenario für die Hubschraubersimulation, das im Rahmen einer studentischen Arbeit erstellt wurde [46]. Es enthält auf einer Fläche von einem Quadratkilometer neben Hindernissen wie Hochspannungsleitungen, Hochhäusern, Bäumen, Baukränen und einem Windpark auch mehrere Straßen und einen Knotenpunkt zweier mehrspuriger Straßen mit Lichtsignalanlagen (LSA). Abbildung 48 zeigt diesen Knotenpunkt ohne Fahrzeuge. Es ist zu erkennen, dass die Straßen jeweils über zwei Fahrstreifen verfügen.

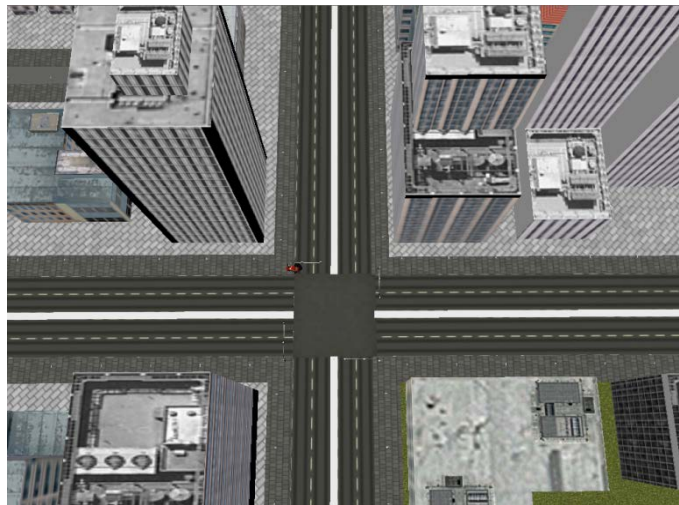


Abbildung 48 Knotenpunkt in Obstacle City

Im Szenario gibt es neben einem Krankenhauslandeplatz, der sich inmitten der Hinderniskulisse im Nordosten der Stadt befindet, noch einen weiteren Landeplatz, der südwestlich des Stadtgebiets in der Nähe eines Kraftwerks liegt. Außerdem verfügt das Szenario über eine Waldlichtung am südlichen Rand des Szenarios, die eine weitere Möglichkeit für Landungen unter engen Platzverhältnissen (engl.: *confined area landings*) bietet (vgl. Abbildung 49). Eine Landung wäre im Falle eines Rettungseinsatzes auch im Bereich der Straßenkreuzung denkbar (s. Abbildung 48).



Abbildung 49 Übersicht über das Szenario ‚Obstacle City‘

Quelle: [46], S. 25

Zusammenfassend betrachtet, ist der bisherige Stand von Obstacle City also durch eine Fülle von Hindernissen gekennzeichnet, welche den Piloten im Falle einer Landung vor anspruchsvolle Situationen stellen. Um diese erhöhten Anforderungen des bisherigen statischen Szenarios noch zu verstärken und dessen Realitätsgrad zu erhöhen, werden einzelne vorhandene Elemente im Rahmen dieser Arbeit um eine Bewegung bzw. Dynamik erweitert. Damit sollen auch Piloten mit hohem Trainingsstand und viel Flugerfahrung in Situationen gebracht werden können, die sie bis an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit oder darüber hinaus fordern. Dies ermöglicht die Bewertung neu entwickelter Assistenzsysteme durch Probanden im Rahmen von Testflügen im Simulator unter realistischeren Bedingungen. Insbesondere der Nutzen von aktiven Steuerelementen, die dem Piloten in Form von Hinweiskräften in der Steuerung haptische Rückmeldungen über das Erreichen gefährlicher Flugzustände oder die Annäherung an bzw. von Hindernissen geben, kann so verifiziert werden. Ziel dabei ist es stets, die Systeme so zu optimieren, dass der Nutzer sie als nützlich und hilfreich bewertet (Nutzerakzeptanz). Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn sie ihn zu intuitiv richtig abgeleiteten Reaktionen veranlassen, wodurch sich seine Arbeitsbelastung (engl.: *mental workload*) verringert. Diese Reduzierung lässt sich mit dem Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen begründen (vgl. Abschnitt 2.4.1). Ist es möglich, die Hinweise eines Assistenzsystems auf der Ebene fertigkeitsbasierten Handelns intuitiv zu verarbeiten, so ist davon auszugehen, dass die Nutzung des Systems in schwierigen Situationen zu einer Verringerung der mentalen Belastung des Piloten führt.

4.1 Bewegung der Kraftfahrzeuge

Bei den verwendeten Fahrzeugen handelt es sich um drei verschiedene PKW und einen LKW aus dem bestehenden Szenario. Darin waren alle Fahrzeuge in einer Gruppierung eingefügt, welche entfernt wurde. Die Bearbeitung erfolgte, wie bei den anderen 3D-Modellen auch, mit der Software 3dsMax. Zunächst wurden die Fahrzeuge jeweils auf die Größe skaliert, die im Maßstab des Szenarios ihren realen Vorbildern entspricht. Für jedes der vier Fahrzeugmodelle wurde anschließend eine eigene max-Datei erstellt, welche schließlich in einem Format exportiert wurde, das der für die Sichtsimulation verwendete Renderer anzeigen kann. Abbildung 50 zeigt die vier oben genannten Fahrzeuge.



Abbildung 50 In Obstacle City verwendete Fahrzeuge

Ähnlich wie bei den Windkraftanlagen des Offshore-Szenarios wird auch für die Bewegung der Fahrzeuge in Obstacle City eine xml-Konfigurationsdatei verwendet. Da sich ihre Positionen während der Simulation fortlaufend ändern sollen, ist vorgesehen, sie für jedes Fahrzeug über einen UDP-Sender an die Simulation zu senden. Dafür liegt bereits eine auf die Abmessungen der in Obstacle City verwendeten Fahrzeuge und das Szenario selbst angepasste Simulation vor, die in der Lage ist, für maximal 50 Fahrzeuge entsprechende Daten mit einer Frequenz von 60 Hz zu senden. Dieses auf Obstacle City angepasste Programm wurde freundlicherweise von Herrn Julian Schindler vom Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR in Braunschweig zur Verfügung gestellt [47]. Es enthält eine kollisionsfreie Simulation der Fahrzeugbewegungen, Abbiegevorgänge der Fahrzeuge (nur PKW, vgl. Abbildung 51 a)), und eine Verkehrsregelung durch Lichtsignalanlagen am Knotenpunkt der beiden mehrspurigen Straßen. Dies sind auch die beiden einzigen Straßen, auf denen die Bewegungen der Fahrzeuge simuliert werden. Für die kleineren Straßen ist zurzeit keine Simulation der Fahrzeugbewegungen vorgesehen. Um Hubschrauberlandungen bei Rettungseinsätzen auch im Kreuzungsbereich zu ermöglichen, können die Lichtsignalanlagen für alle Richtungen gleichzeitig auf Rot geschaltet werden (vgl. Abbildung 51 b)). Die Fahrzeuge verfügen entsprechend ihres Typs über unterschiedliche maximale Beschleunigungen und Verzögerungen. In der rechten Hälfte von Abbildung 51 ist jeweils die Bedienoberfläche für die links daneben dargestellte Situation abgebildet. Zwischen Abbildung 51 a) und b) wurden alle Lichtsignalanlagen mit ‚GoRed‘ auf Rot geschaltet. Wenn nach einigen Sekunden alle Fahrzeuge die Kreuzung geräumt haben, ist eine Hubschrauberlandung möglich (s. Abbildung 51 b), links). Nach dem Start des Hubschraubers wird in der Benutzeroberfläche auf ‚GoNormal‘ umgeschaltet und das normale Programm beginnt wieder (s. Abbildung 51 c)).

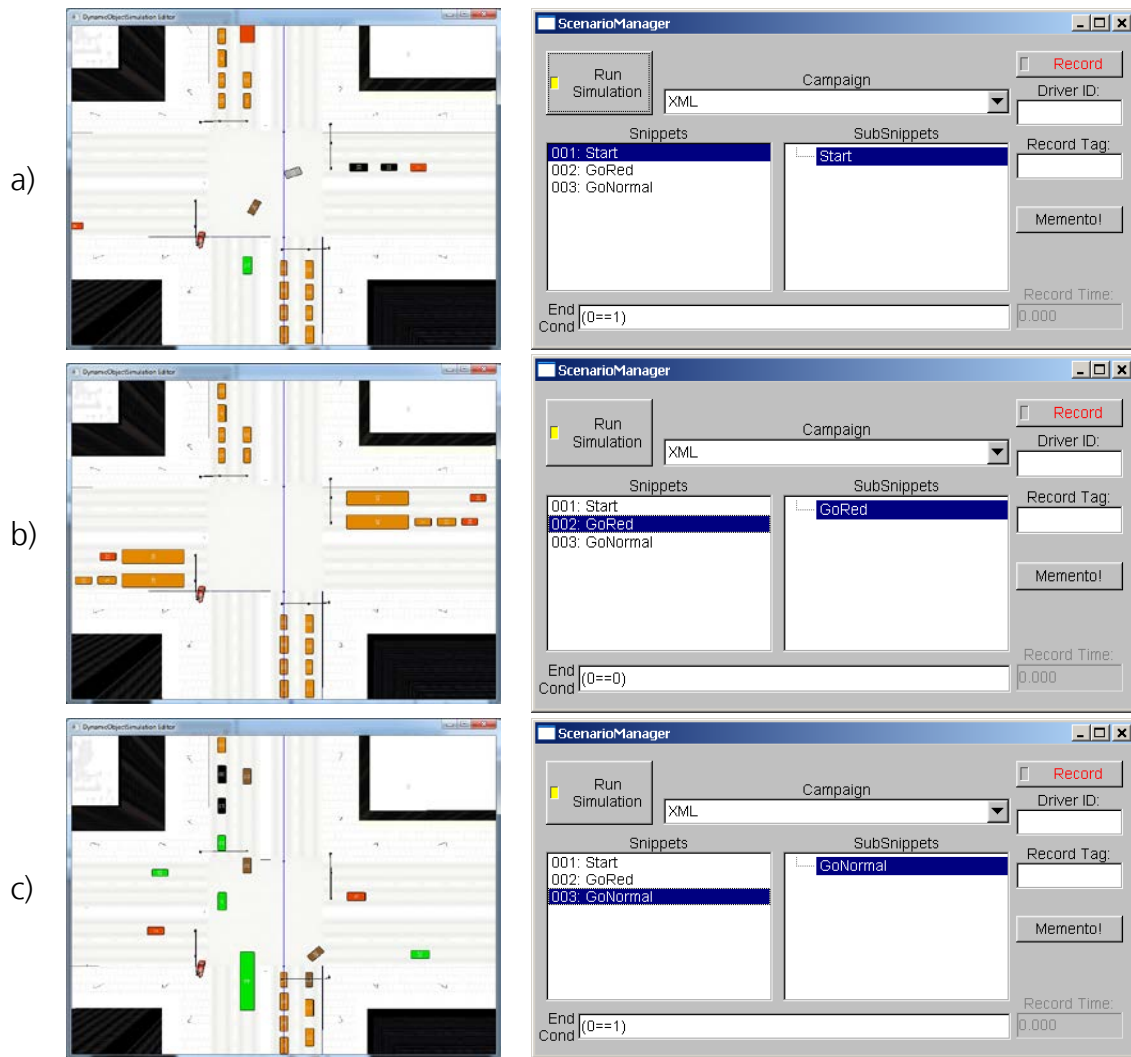


Abbildung 51 Ausgabe und Bedienoberfläche der Fahrzeugsimulation

In Abbildung 52 ist ein Teil der grafischen Ausgabe des Simulationstools zu sehen. Die darin enthaltenen Fahrzeuge sind als Rechtecke dargestellt und einzeln nummeriert. Die Texturen des Szenarios werden in der grafischen Ausgabe des Simulationstools leider nicht korrekt angezeigt, was dazu führt, dass die Straße mit ihren Markierungen nur sehr schwach zu erkennen ist (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 52).

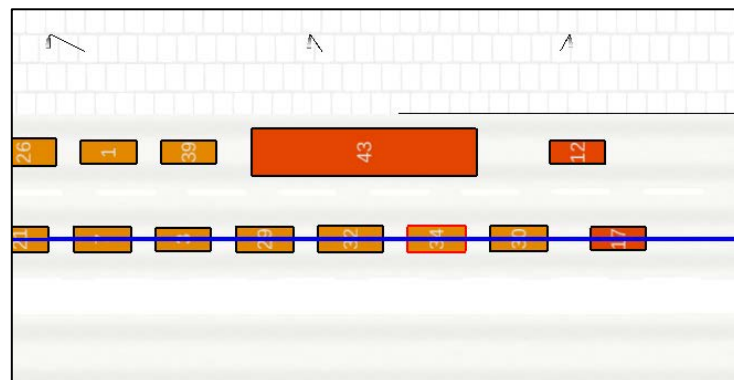


Abbildung 52 Grafische Ausgabe des Simulationstools

Leider konnte die Anbindung der aus diesem Simulationsprogramm heraus gesendeten Daten an die Sichtsimulation im Rahmen dieser Arbeit noch nicht vorgenommen werden. Die Bewegungsdaten, die das Simulationstool sendet, müssen dazu von der xml-Konfigurationsdatei empfangen werden können. Hierfür muss die xml-Datei so konfiguriert werden, dass sie auf dem gleichen Port Daten empfängt, wie sie vom Simulationstool gesendet werden. Innerhalb dieser xml-Datei erfolgt dann die Zuordnung der Daten anhand ihrer Nummerierung zu den einzelnen Fahrzeugmodellen. Hierzu muss bekannt sein, bei welchen Nummern es sich um welchen Fahrzeugtyp handelt. Abbildung 53 zeigt, wie die einzelnen Fahrzeuge prinzipiell in der xml-Datei repräsentiert werden. Die Datei muss insgesamt 50 Fahrzeuge enthalten, damit in der Sichtsimulation auch alle Fahrzeuge dargestellt werden können, für die vom Simulationstool Daten gesendet werden.

```
<object type="ANIM">
  <file>D:\visualsim\vehicles\Truck.ive</file>
  <name>Truck_01</name>
  <position>0.0, 0.0, 0.0</position>
  <orientation>0, 0, 0</orientation>
</object>

<object type="ANIM">
  <file>D:\visualsim\vehicles\Truck.ive</file>
  <name>Truck_02</name>
  <position>0.0, 0.0, 0.0</position>
  <orientation>0, 0, 0</orientation>
</object>

<object type="ANIM">
  <file>D:\visualsim\vehicles\Car_Model_1.ive</file>
  <name>Car_01</name>
  <position>0.0, 0.0, 0.0</position>
  <orientation>0, 0, 0</orientation>
</object>

<object type="ANIM">
  <file>D:\visualsim\vehicles\Car_Model_1.ive</file>
  <name>Car_02</name>
  <position>0.0, 0.0, 0.0</position>
  <orientation>0, 0, 0</orientation>
</object>

<object type="ANIM">
  <file>D:\visualsim\vehicles\Car_Model_2.ive</file>
  <name>Car_03</name>
  <position>0.0, 0.0, 0.0</position>
  <orientation>0, 0, 0</orientation>
</object>
```

Abbildung 53 Prinzipielle Repräsentation der Fahrzeuge in der xml-Datei

4.2 *Bewegung der Turmdrehkrane*

Im bisherigen Szenario von Obstacle City war bereits eine Baustelle mit zwei statischen Turmdrehkranen vorhanden. Für die Implementierung der Kranbewegungen wurde ein Modell mit mehreren Baugruppen benötigt. Da der Aufwand eines Umbaus des vorhandenen Modells als zu hoch eingeschätzt wurde, wurde ein neues Kranmodell erstellt. Es handelt sich dabei um das Modell eines Obendreher-Turmdrehkrans, das in verschiedene Baugruppen unterteilt ist. Jede dieser Baugruppen kann in der Simulation einzeln angesteuert und bewegt werden. Es handelt sich dabei im Einzelnen um:

- die Baugruppe ‚Haken‘, welche den Lasthaken enthält, der auf und ab bewegt werden kann,
- die Baugruppe ‚Laufkatze und Haken‘, die diese beiden Elemente umfasst, welche damit gemeinsam in Richtung des Auslegers vor und zurück bewegt werden können.
- und die Baugruppe ‚Ausleger‘, die alle Elemente der beiden anderen Baugruppen enthält und eine Rotation dieser um die Drehachse des Krans ermöglicht.

Alle Elemente dieser drei Baugruppen sind wiederum Teil einer übergeordneten Baugruppe, die die Positionierung des Krans im Szenario ermöglicht. Noch nicht mit dargestellt wird das Kranseil. Da dieses jedoch auch ein Hindernis darstellt, soll es in naher Zukunft noch hinzugefügt werden. Um die Seillänge in der Simulation variieren zu können, wird das Seil doppelt, jedoch nur mit halber Länge eingefügt. Eine Hälfte bewegt sich nur mit der Laufkatze vor und zurück (neue Baugruppe ‚Laufkatze und Seil‘). Die andere wird zur Baugruppe des Lasthakens hinzugefügt. Der bisherigen Baugruppe ‚Laufkatze und Haken‘ werden die beiden Teile des Seils, die Laufkatze und der Lasthaken zugeordnet.

Die Ansteuerung der beiden Krane erfolgt zurzeit wie bei den Windkraftanlagen über eine xml-Konfigurationsdatei. Es ist jedoch auch relativ einfach möglich, eine manuelle Ansteuerung per Tastatur oder Joystick zu implementieren. Denkbar wäre außerdem die Aufzeichnung eines Bewegungsablaufs, welche später in der Simulation manuell oder automatisch, zum Beispiel bei Erreichen einer bestimmten Position durch den Hubschrauber, ausgelöst werden könnte. Abbildung 54 zeigt das 3D-Modell des Krans in Obstacle City.

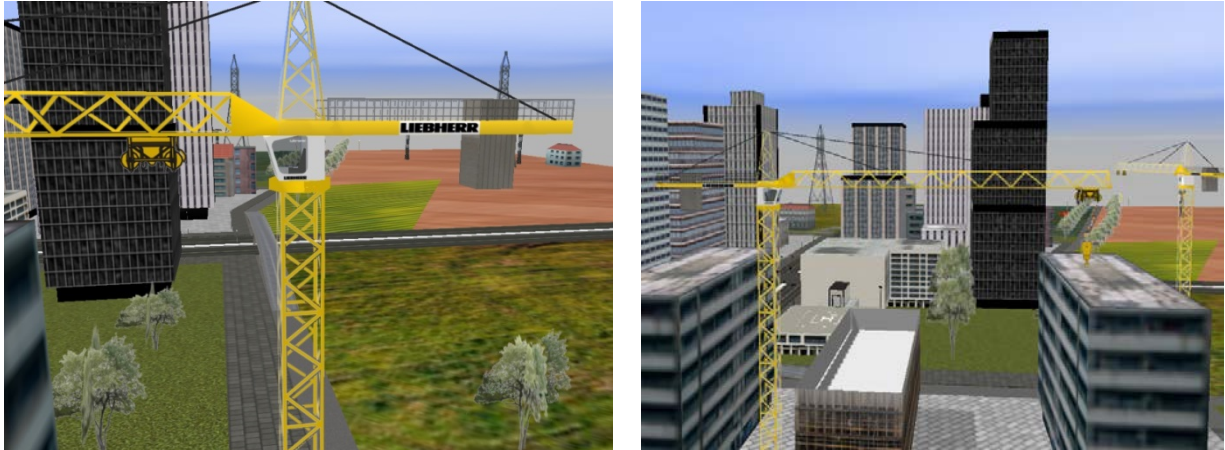


Abbildung 54 Turmdrehkran in Obstacle City

An der Abbildung ist auch eine weitere Änderung zu erkennen, die am Szenario vorgenommen wurde. Es handelt sich dabei um die Bäume. Diese sahen zwar mit dem vorher verwendeten Modell etwas realistischer aus, besonders in Bezug auf ihr Volumen. Jedoch kosteten die bisherigen Bäume aufgrund ihrer höheren Komplexität bei gleichzeitig großer Anzahl vergleichsweise viel an Rechenleistung. Die neuen Bäume bestehen jeweils nur aus zwei Quadern, die gekreuzt zueinander angeordnet und mit einer transparenten Textur versehen wurden. Die neuen Bäume wurden an die gleichen Positionen gesetzt, an denen die bisherigen Bäume standen und diesen in ihren Abmessungen angepasst. Leider fehlten im Szenario vor dem Austausch aller vorhandenen Bäume im Bereich der Waldlichtung offenbar einige, so dass die Lichtung zurzeit zu einer Seite offen ist. Dieser Fehler soll aber in Kürze korrigiert werden, um die in [46] beschriebene Lichtung wiederherzustellen.

4.3 Windkraftanlagen

Die Modelle der Windkraftanlagen des bisherigen Szenarios wurden so modifiziert, dass sie in den Wind gedreht werden können und ihre Rotoren sich drehen lassen. Dazu wurden sie durch Aufschneiden entlang von Schnittebenen in unterschiedliche Baugruppen unterteilt, denen für die Verwendung in der Simulation über eine xml-Konfigurationsdatei eine Bewegung zugewiesen werden kann. Dabei gelten für die Windkraftanlagen in Obstacle City prinzipiell die gleichen Zusammenhänge wie in Abschnitt 3.4.2 für die Offshore-Windkraftanlagen beschrieben. Eine Steuerung der Anlagen wäre auch hier über eine Bedienoberfläche möglich, von der aus die eingestellten Werte per UDP an die Simulation gesendet werden. Damit ließen sich während der laufenden Simulation zum Beispiel auch einzelne Anlagen anhalten.

4.4 Kraftwerk

Da bei der Erzeugung elektrischer Energie aus fossilen Brennstoffen Abgase aus der Verbrennung und Wasserdampf aus der Kühlung anfallen, wäre für das im Szenario ‚Obstacle City‘ enthaltene Kraftwerk auch die Darstellung dynamischer Rauch- bzw. Dampfwolken denkbar. Diese ließen sich zum Beispiel auf der Grundlage eines Partikelsystems realisieren. Die Partikel würden beim Austritt aus dem Schornstein zusätzlich zu der nach oben wirkenden Geschwindigkeitskomponente noch eine Querkomponente erhalten, deren Betrag und Richtung von der in der Simulation eingestellten Windgeschwindigkeit und -richtung abhängig gemacht werden können. Für die Realisierung dieses dynamischen Effekts bietet sich die Verwendung der OpenSceneGraph-Erweiterung ‚osgParticle‘ an.

4.5 Weiterer Hubschrauber

Mit Hilfe eines weiteren fliegenden Hubschraubers ließe sich in Tests mit Probanden eine neue, für den Piloten unvorhergesehene Situation herbeiführen. Denkbar wäre zum Beispiel der Einsatz eines über der Stadt kreisenden Polizeihubschraubers, um den Probanden während des Starts vom Krankenhauslandeplatz zusätzlich abzulenken. Die Daten eines manuell geflogenen Flugverlaufs des zweiten Hubschraubers werden dafür zuvor aufgezeichnet. Damit ist auch die Erstellung komplexerer Flugverläufe inklusive Starten und Landungen relativ einfach möglich. Die Wiedergabe während der Simulation kann entweder manuell oder bei Erreichen einer bestimmten Position automatisch gestartet werden. Ein entsprechendes Tool für die Wiedergabe aufgezeichneter Flugverläufe ist mit dem ‚Gyrotrain Data Replayer‘ (GyroReplayer.exe.) bereits vorhanden.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden für die Sichtsimulation zwei Szenarien weiterentwickelt und dabei um dynamische Elemente ergänzt. Die größte Herausforderung dabei war die Implementierung der Schiffsdynamik. Zwar stand mit der OpenSceneGraph-Erweiterung `osgOcean` ein sehr gutes Tool zur Darstellung von Ozeanwellen in der Simulation zur Verfügung. Aufgrund der Besonderheiten der darin verwendeten Methoden waren jedoch nicht alle physikalischen und statistischen Zusammenhänge, die für einen realen Seegang gelten, gleichermaßen anwendbar. Dennoch ist es schließlich gelungen, die Schiffsbewegung in Abhängigkeit von der Wellenanregung auf sinnvolle Weise zu implementieren. Die Gesamtbewegung wurde als Superposition der drei wichtigsten Komponenten Tauchen, Rollen und Stampfen auf der Grundlage dreier ungekoppelter Bewegungsdifferentialgleichungen modelliert. Der anfängliche Verzicht auf die Kopplungen stellte sich später noch als nützlich heraus, da die gefundene Methode zur Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten strenggenommen nur für ungekoppelte Bewegungen gültig ist [11]. Am zweiten Szenario, *Obstacle City*, wurden im Rahmen dieser Arbeit überwiegend kleinere Änderungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Implementierung einer dynamischen Simulation von Kraftfahrzeugen innerhalb des Szenarios theoretisch betrachtet und die noch erforderlichen Arbeitsschritte erläutert. Nach Abschluss dieses noch fehlenden Schrittes werden für die Sichtsimulation zwei dynamische Szenarien zur Verfügung stehen, mit denen die Tests neu entwickelter Pilotenassistenzsysteme im neuen Simulator AVES unter noch etwas realistischeren Bedingungen durchgeführt werden können. Insbesondere bei Tests mit Probanden, mit deren Hilfe der Nutzen neuer Systeme evaluiert wird, spielt diese Nähe zur Realität eine wichtige Rolle. Mit der neu hinzugefügten dynamischen Schiffsbewegung lassen sich möglicherweise zukünftig auch Assistenzsysteme für Schiffsdecklandungen im Simulator erproben.

Literaturverzeichnis

- [1] Journée, J. M. J./Pinkster, J. (2002): Introduction in Ship Hydromechanics, Delft University of Technology, http://www.shipmotions.nl/DUT/LectureNotes/ShipHydromechanics_Intro.pdf, 08.07.2013.
- [2] Stewart, R. H. (2008): Introduction To Physical Oceanography, Texas A & M University, http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book.pdf, 08.07.2013.
- [3] Lamb, H. (1945): Hydrodynamics, 6th, first American edition, New York (Dover Publications) 1945.
- [4] Krogstad, H. E./Arntsen, Ø. A. (2000): Linear Wave Theory Part B, http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/lwt_ran_2000_part_b.pdf, 08.11.2013.
- [5] Perez, T./Fossen, T. I. (2007): Tutorial on Modelling and Simulation of Marine System Dynamics, Bol, Croatia (.
- [6] Andersen, T. L./Frigaard, P. (2011): Lecture Notes for the Course in Water Wave Mechanics, Aalborg University, Department of Civil Engineering, http://vbn.aau.dk/files/60647156/Lecture_Notes_for_the_Course_in_Water_Wave_Mechanics.pdf, 23.07.2013.
- [7] Malcherek, A. (2010): Gezeiten und Wellen, 1. Auflage (Vieweg+Teubner) 2010.
- [8] Phillips, O. M. (1957): On the generation of waves by turbulent wind, in: Journal of Fluid Mechanics, 05/2, S. 417–445.
- [9] Liu, Z./Frigaard, P. (1999): Generation and Analysis of Random Waves, Aalborg Universitet, <http://vbn.aau.dk/files/35439628/Generation%20and%20Analysis%20of%20Random%20Waves%20-%20part%201.pdf>; <http://vbn.aau.dk/files/35439629/Generation%20and%20Analysis%20of%20Random%20Waves%20-%20part%202.pdf>, 23.07.2013.
- [10] Sorensen, R. M. (2006): Basic Coastal Engineering, Third Edition, New York (Springer Science+Business Media, Inc.) 2006.
- [11] Journée, J. M. J./Massie, W. (2001): Offshore Hydromechanics, Delft University of Technology, <http://shipmotions.nl/DUT/LectureNotes/OffshoreHydromechanics.pdf>, 11.08.2013.
- [12] Hack, K. H. (2003): Flugwetter, 1. Auflage, Zürich (Bösch) 2003.
- [13] Deutscher Wetterdienst (2013): Vorhersagekarte für Wind- und Seegang, http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_schiffahrt_seewetter&T18605618401151909347274gsbDocumentPath=Navigation%2FSchiffahrt%2FSeewetter%2FVorhersagekarte__Windseegang__Nordssee__node.html%3F__nnn%3Dtrue, 04.08.2013.
- [14] Hasselmann, K. (1973): Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JON SWAP), in: Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A (8°), Nr.12, S. 47.
- [15] Fossen, T. I. (2005): A NONLINEAR UNIFIED STATE-SPACE MODEL FOR SHIP MANEUVERING AND CONTROL IN A SEAWAY, in: International Journal of Bifurcation and Chaos, 09/15, S. 2717–2746, http://www.itk.ntnu.no/fag/gnc/papers/Fossen_IJBC05.pdf, 08.11.2013.
- [16] Vugts, J. H. (1970): The Hydrodynamic Forces and Ship Motions in Waves, Delft (Uitgeverij Waltman) 1970.

- [17] Gronarz, A. (1997): Rechnerische Simulation der Schiffsbewegung beim Manövrieren unter besonderer Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Wassertiefe, Duisburg (.)
- [18] WAMIT, I. (2013): WAMIT User Manual, WAMIT, Incorporated and Massachusetts Institute of Technology, http://www.wamit.com/manualupdate/V70_manual.pdf, 14.08.2013.
- [19] Hau, E. (2008): Windkraftanlagen, 4., vollständig neu bearbeitete Auflage, Berlin (Springer) 2008.
- [20] Winner, H./Hakuli, S./Wolf, G. (2012): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2, Wiesbaden (Vieweg + Teubner) 2012.
- [21] Maurer, M. (2012): Vorlesung Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Braunschweig (.)
- [22] Rasmussen, J. (1983): Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models, in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 3/13, S. 257–266.
- [23] Kerkau, F. (12.12.2005): Biosignale der Pupille zur Steuerung intelligenter User Interfaces, Berlin (.)
- [24] Groeneveld, H. (2012): Errichtung Offshore-Windpark BARD Offshore 1 – Logistische Erfahrungen, <http://www2.wi.fh-flensburg.de/windlog-wAssets/docs/Dritte-windlog/Errichtung-Offshore-Windpark-BARD-Offshore-1-o.pdf>, 27.11.2013.
- [25] Bale, K. (2009): osgocean An ocean rendering nodekit for OpenSceneGraph, <https://code.google.com/p/osgocean/>, 14.10.2013.
- [26] OpenSceneGraph (2013): The OpenSceneGraph Project Website, <http://www.openscenegraph.org/>, 14.10.2013.
- [27] Bale, K. (2009): FFTSimulation.cpp, Bale, Kim; The University of Hull, <http://osgocean.googlecode.com/svn/trunk/src/osgOcean/FFTSimulation.cpp>, 14.11.2013.
- [28] Tessendorf, J. (2004): Simulating Ocean Water, Clemson University, http://people.clemson.edu/~jtessen/papers_files/coursenotes2004.pdf, 29.10.2013.
- [29] Visser, A.: Auke Visser's International Super Tankers, <http://www.aukevisser.nl/supertankers/part-1/id235.htm>, 12.10.2013.
- [30] Bergen Group (2010): Island Enforcer, Bergen Group, http://www.bergengroup.no/publish_files/BN_164_Island_Enforcer_Aug2010.pdf, 15.10.2013.
- [31] Presse- und Informationszentrum Marine: Fregatte „Sachsen“-Klasse (124), Presse- und Informationszentrum Marine, http://www.marine.de/portal/a/marine/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP3I5EyrpHK93MQivfLEtLTUvNI8vbSiVKCKktQ8veLE5Izi1Dz9gmXHRQAdaA-2/#par2, 12.10.2013.
- [32] Orcina Ltd. (2012): OrcaFlex Demo, Ulverston, Cumbria, UK (2012).
- [33] Orcina Ltd. (2013): OrcaFlex Manual, <http://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation/OrcaFlex.pdf>, 31.08.2013.
- [34] Orcina Ltd. (2007): Calculated vessel motion: comparison with NMIWAVE, Orcina Ltd., <http://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Validation/99-106%20Calculated%20vessel%20motion%20comparison%20with%20NMIWAVE.pdf>, 11.11.2013.
- [35] Rawson, K. J./Tupper, E. C. (2001): Basic Ship Theory 2, 5, Oxford [u.a.] (Butterworth-Heinemann) 2001.

- [36] Zaojian, Z. (2006): Ship Manoeuvring and Seakeeping, Shanghai Jiao Tong University, <http://naoce.sjtu.edu.cn/pna/teach/images/sm01.rar>, 31.10.2013.
- [37] Kornev, N. (2012): Ship dynamics in waves, Universität Rostock, http://www.lemos.uni-rostock.de/fileadmin/MSF_Lemos/Lehre/Schiffstheorie_II/STII_Ship_dynamics_in_waves.pdf, 16.10.2013.
- [38] Bale, K. (2009): oceanExample - application.cpp, Bale, Kim; The University of Hull, <http://osgocean.googlecode.com/svn/trunk/src/oceanExample/application.cpp>, 20.10.2013.
- [39] Hecht, S. (2013): Zeitmessung mit C++ mit dem QueryPerformanceCounter, online-tutorials.net, <http://www.online-tutorials.net/system/zeitmessung-mit-c++-mit-dem-queryperformancecounter/sourcecodes-t-19-244.html>, 25.11.2013.
- [40] Rawson, K. J./Tupper, E. C. (2001): Basic Ship Theory 1, 5, Oxford [u.a.] (Butterworth-Heinemann) 2001.
- [41] Derrett, D. R./Barrass, C. B. (2006): Ship Stability for Masters and Mates, 6, Burlington, Mass (Butterworth-Heinemann) 2006.
- [42] Cochrane, E./Vedeler, G. (1951): Subject 6 - Seagoing Qualities of Ships/6, S. 154–188, <http://itc.sname.org/proc6/Seagoing%20Qualities%20of%20Ships.pdf>, 24.11.2013.
- [43] Burger, M. (2013): Skriptum zur Vorlesung "Numerik Partieller Differentialgleichungen", Universität Münster, http://www.math.uni-muenster.de/num/Vorlesungen/NumPDGL_WS06/skript.pdf, 27.11.2013.
- [44] Munz, C.-D. (2012): Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen, 3. Aufl. 2012., Berlin, Heidelberg (Springer Berlin Heidelberg) 2012.
- [45] Irretier, H. (2006): Schwingungstechnik, Universität Kassel, http://www.uni-kassel.de/maschinenbau/fileadmin/datas/fb15/IFM/SkriptST_6.Aufl-2012_01.pdf, 22.11.2013.
- [46] Dögow, R. (2013): Erhebung von realistischen Hindernisszenarien und Pilotenerwartung für ein haptisches Hinderniswarnsystem sowie 3D-Darstellung der Szenarien für den Simulator, Lübeck/Braunschweig.
- [47] Schindler, J. (2013): FT_JDVE, Braunschweig (DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik) 2013.

Anhang

Anhang A Funktion ‚Calculate_coefficients‘

```
double Calculate_coefficients (double L, double Lpp, double B,
double mass, double draught, double CGz,
double r_gx, double r_gy,
double &a33, double &b33, double &c33,
double &a44, double &b44, double &c44,
double &a55, double &b55, double &c55){

    //Metacentric heights GM and GM_L
    double KG = draught + CGz;
    double KB = 0.5 * draught;
    double BM = (B*B) / (12.0 * draught);
    double BM_L = (L*L) / (12.0 * draught);
    double KM = KB + BM;
    double KM_L = KB + BM_L;
    double GM = KM - KG;
    double GM_L = KM_L - KG;

    //Waterline area
    double A_WL = B * Lpp * ( 1 - sqrt(0.5) * (B/Lpp) );

    //Virtual inertia factor ("added mass factor")
    double a_factor = sqrt(0.6 + 0.36 * B/draught);

    //Inertia radii
    double kxx = r_gx * B;
    double kyy = r_gy * L;
```

```

//Natural Periods
double Th = 2*PI * a_factor* sqrt( mass / (density_sea_water * 9.81 * A_WL)); //heave
double Tr = 2*PI * kxx * a_factor / sqrt (9.81 * GM); //roll
double Tp = 2*PI * kyy * a_factor / sqrt (9.81 * GM_L); //pitch

//Heave coefficients
double omega_0_h = (2*PI) / Th;
double kappa_h = 0.51;
c33 = density_sea_water * 9.81 * A_WL;
a33 = c33 / (omega_0_h * omega_0_h) - mass;
b33 = (2.0 * kappa_h * c33) / omega_0_h;

//Roll coefficients
double omega_0_r = (2*PI) / Tr;
double kappa_r = 0.45; //0.35; //0.45;
c44 = mass * 9.81 * GM;
a44 = c44 / (omega_0_r * omega_0_r) - (kxx*kxx) * mass;
b44 = (2.0 * kappa_r * c44) / omega_0_r;

//Pitch coefficients
double omega_0_p = (2*PI) / Tp;
double kappa_p = 0.25;
c55 = mass * 9.81 * GM_L;
a55 = c55 / (omega_0_p * omega_0_p) - (kyy*kyy) * mass;
b55 = (2.0 * kappa_p * c55) / omega_0_p;

```

```

//Block coefficient (Voelligkeitsgrad der Verdraengung)
double Cb = (mass/density_sea_water) / (Lpp*B*draught);

//Waterline area coefficient (Voelligkeitsgrad der Wasserlinienflaeche)
double Cw = A_WL / (Lpp*B);

//Tons per centimetre immersion
double TPC = A_WL * density_sea_water * 0.00001;

//Fresh water allowance
double FWA = (mass * 0.001) / (4 * TPC);

cout<<"\n\n\n" GM= "<<GM<<" GM_L= "<<GM_L<<endl;
cout<<"\n AWL= "<<A_WL<<" TPC= "<<TPC<<" FWA= "<<FWA<<endl;
cout<<"\n Cb= "<<Cb<<" Cw= "<<Cw<<endl;
cout<<"\n Th= "<<Th<<" Tr= "<<Tr<<" Tp= "<<Tp<<endl;

cout<<"\n"<<endl;
//cout<<std::fixed<<setprecision(1)<<endl;
cout<<" a33= "<<a33<<" a44= "<<a44<<" a55= "<<a55<<endl;
cout<<" b33= "<<b33<<" b44= "<<b44<<" b55= "<<b55<<endl;
cout<<" c33= "<<c33<<" c44= "<<c44<<" c55= "<<c55<<endl;
cout<<"\n\n\n"<<endl;

return (0);
}

```

Anhang B Funktion 'Calculate_motion'

```

double Calculate_motion (double &wave_displ_now, double &wave_vel_now, double &wave_acc_now,
    double &wave_displ_last, double &wave_vel_last, double &wave_acc_last,
    double &displ_next, double &vel_next, double &acc_next,
    double &displ_now, double &vel_now, double &acc_now,
    double &displ_last, double &vel_last, double &acc_last,
    //double &Inertia, double &Spring, double &Damping,
    //double &Total, double &Total_d,
    double a, double b, double c,
    double mass, double step){

    double Spring, Inertia, Damping, Total, Total_d;

    //Numerische Differentiationen
    wave_vel_now = (wave_displ_now - wave_displ_last) / step;    //Winkelgeschwindigkeit des Neigungswinkels zwischen
                                                                    //den gemessenen Wellen (bei roll und pitch)
                                                                    //bzw. Geschwindigkeit der Wasserspiegelauslenkung
                                                                    //(bei heave)

    wave_acc_now = (wave_vel_now - wave_vel_last) / step;        //Winkelbeschleunigung des Neigungswinkels zwischen
                                                                    //den gemessenen Wellen (bei roll und pitch)
                                                                    //bzw. Beschleunigung der Wasserspiegelauslenkung
                                                                    //(bei heave)

    //Bewegungsgleichung
    Spring = (wave_displ_now - displ_now) * c;    //Federterm in Abhaengigkeit vom Auslenkungswinkel des Schiffes und des
                                                    //Neigungswinkels zwischen den gemessenen Wellen (bei roll und pitch)
                                                    //bzw. von der Eintauchtiefe (bei heave)

```

```

Inertia = wave_acc_now * a;

//Traegheitsterm der zusaetzlichen Masse
//( = hydrodynamische Masse: durch Beschleunigung von Wasserteilchen
//in der Grenzschicht nahe der Schiffsoberflaeche)

Total = Spring + Inertia;
Damping = (wave_vel_now - vel_now) * b;
Total_d = Total + Damping;

//Gesamtkraft (bei heave) bzw. -moment (bei roll und pitch)
//Daempfungsterm, [Nm] bei roll und pitch, [N] bei heave
//gedaempftes Gesamtmoment um x- bzw. y-Achse bzw. gedaempfte
//Gesamtkraft in z-Richtung

acc_now = Total_d / (mass + a);
//aktuelle Beschleunigung [m/s^2] bei heave
//bzw. Winkelbeschleunigung [rad/s^2] bei roll und pitch des Schiffes

//Numerische Integration mit dem Adams-Bashforth-Verfahren 2. Ordnung (AB 2)
vel_next = vel_now + 0.5 * step * ( 3.0 * acc_now - acc_last);
displ_next = displ_now + 0.5 * step * ( 3.0 * vel_now - vel_last);

return(0);
}

```